

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vytautas JOCIUS

CEMENTO TIPO, UŽPILDŲ IR ORO KIEKIO MIŠINYJE ĮTAKA BETONO ATSPARUMUI UGNIAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2017

Disertacija rengta 2011–2017 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

dr. Viktor GRIBNIAK (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

dr. Diana BAJARE (Rygos technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),
dr. Irmantas BARAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, chemijos inžinerija – 05T),
dr. Marijonas SINICA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),
prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2017 m. rugpjūčio 28 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2017 m. liepos 18 d. Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2017-044-S mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-042-6

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2017

© Vytautas Jocius, 2017

vytautas.jocius@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vytautas JOCIUS

**CEMENT TYPE, AGGREGATES AND
AIR CONTENT IN CONCRETE MIXTURE
INFLUENCE ON THE FIRE RESISTANCE
OF CONCRETE**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2017

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2017.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Dr Viktor GRIBNIAK (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr Diana BAJARE (Riga Technical University, Materials Engineering – 08T),

Dr Irmantas BARAUSKAS (Kaunas University of Technology, Chemical Engineering – 05T),

Dr Marijonas SINICA (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 28 August 2017**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 18 of July 2017.

A copy of the doctoral dissertation is available for review on the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Betono atsparumas ugniai yra svarbus veiksnys pastatų konstrukcijų gaisrinei saugai, kuri apibrėžiama remiantis šiais kriterijais: R – geba atlaikyti konstrukcijų apkrovas, E – atitikti (tenkinti) vientisumo ir I – izoliavimo charakteristikas nustatytą laiką gaisro metu. Šiuo metu projektuojant gelžbetoninių konstrukcijų atsparumą ugniai yra atsižvelgiama į apsauginio sluoksnio iki armatūros storį, tačiau nevertinamos betono, iš kurio pagaminta konstrukcija, eksploatacinės savybės ir sudedamosios dalys: cemento sudėtis, užpildo charakteristikos ir betone esantis oro kiekis.

Atlikta nemažai mokslinių tyrimų vertinant padarytą gaisro žalą konstrukcijoms iš cementinio betono. Tačiau, mažai dėmesio skiriama betono sudėtinių dalių įtakai – cemento, užpildų bei cheminių įmaišų, turinčių skirtingą įtaką betono savybėms. Betonas yra daugiakomponentis kompozitas, kurio struktūra yra sudėtinga, o veikiant gaisrui betone vyksta daug procesų – nuo šilumos perdavimo, vandens garų migracijos iki įvairių cheminių junginių skilimų. Šiame darbe atliktuose tyrimuose sprendžiamas pagrindinis uždavinys – ištirti cemento tipo, užpildų bei oro kiekio įtaką cementinio betono atsparumui ugniai.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai. Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei betoninių bei gelžbetoninių konstrukcijų atsparumo ugniai klausimais. Skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados ir formuluojami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje aprašytos tyrimams naudotos medžiagos ir atliktų tyrimų metodikos bei naudota įranga. Trečiajame skyriuje pateikti betono destruktinių procesų tyrimai aukštoje temperatūroje bei skirtingų cementų, įvairių užpildų ir oro kiekio betono mišinys įtakos betono atsparumui ugniai tyrimų rezultatai. Darbo pabaigoje suformuluotos bendrosios išvados.

Disertacijos tema paskelbti 3 moksliniai straipsniai ir perskaityti 5 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

Fire resistance of concrete is an important factor for buildings structures fire safety – essential characteristics of buildings, it is defined on the basis of the following criteria: R – ability to withstand structural loads, E – conform to (satisfy) integrity and I – insulation characteristics for the fire resistance period given. During reinforced concrete structures design several criteria are taken into account, excluding, however, performance characteristics and components of concrete (e.g. composition of cement, characteristics of aggregates and air content in concrete mixture) which is used to make the structure.

There are a number of scientific researches carried out with various types of cement concrete to assess the damage caused to cement concrete structures. However, insufficient attention is being paid to the impact of the components of concrete – cements, aggregates and chemical admixtures having different influence on concrete properties. Concrete is a multi-component composite with a complex structure, which if exposed to a fire has numerous processes taking place in it – from heat transfer, water vapor migration to various disintegrations of chemical compounds. The main objective of the researches carried out in the dissertation was to analyze the impact of the types of cement, aggregates and air content in concrete mixture on the fire resistance of cement concrete.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, the list of references and author's publications on the topic of the dissertation. The introduction reveals the investigated problem, the importance of the dissertation, describes the object of the research, describes the purpose and the tasks of the dissertation, the scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the dissertation and presentations in conferences and defining the structure of the dissertation. The first chapter revises the literature used, defines the issues of the impact of high temperatures on the fire resistance of concrete and reinforced concrete structures. At the end of the chapter, conclusions are given and the tasks for the dissertation are formulated. The second chapter presents the materials used for the research, as well as the methodology and the equipment used. The third chapter presents peculiarities of destruction processes of concrete in high temperature and the impact of different types of cements, aggregates and air content on the fire resistance of concrete. At the end of the thesis, general conclusions are given.

Three articles on the subject of the dissertation were published and five reports on the subject of the dissertation have been presented in Lithuanian and foreign conferences.

Žymėjimai

Simboliai

a – atstumas nuo temperatūros veikiamo betono paviršiaus iki armatūros sunkio centro, mm;

a_{500} – atstumas nuo temperatūros veikiamo betono paviršiaus iki sluoksnio, kuriame pasiekama 500 °C temperatūra, mm;

E 30 arba E 180 – elementas, standartinio gaisro sąlygomis atitinkantis vientisumo E kriterijų 30 min arba 180 min;

I 30 arba I 180 – elementas, standartinio gaisro sąlygomis atitinkantis šilumos izoliavimo I kriterijų 30 min arba 180 min;

R – koreliacijos koeficientas;

R^2 – determinacijos koeficientas;

R 30 arba R 180 – elementas, standartinio gaisro sąlygomis atitinkantis laikomosios galios R kriterijų 30 min arba 180 min;

s_e – vidutinis standartinis nuokrypis;

τ – trukmė, min;

T – temperatūra, °C.

Santrumpos

DTA – diferencinė terminė analizė;

DTG – diferencinė termogravimetrija;

IR – infraraudonųjų spindulių spektroskopinė analizė;

TG – termogravimetrinė analizė.

Terminai ir apibrėžimai

Apsauginis sluoksnis – bet kokia medžiaga ar medžiagų derinys, kuriuo padengiamas konstrukcijos elementas, siekiant padidinti jo atsparumą ugniai.

Atsparumas ugniai – konstrukcijos charakteristika gaisro metu atlaikyti nustatytą trukmę apkrovas (R kriterijus), vientisumą (E kriterijus), izoliavimo charakteristikas (I kriterijus).

Kritinė armatūros temperatūra – armatūros temperatūra, kurioje gaisro sąlygomis, esant tam tikram plieno įtempių lygiui, numatoma elemento irtis.

Mineralinis priedas – tai smulkiai sumaltos gamtinės uolienos arba pramonės atliekos, kurių dedama maišant mišinius.

Orą įtraukianti įmaiša – tai medžiaga, didinanti oro kiekį mišiniuose ir sudaranti smulkių sferinių oro porų tinklą. Oro įtraukimas į mišinį vyksta mišinio maišymo metu.

Oro kiekis betono mišinyje – tai oro kiekis, išreikštas procentais ir atsirandantis mišinio sferinėse porose, susidarančiose maišymo metu.

Standartinis gaisras – gaisras, kuris vystosi pagal standarte LST EN 1363-1:2012 aprašytą etaloninę temperatūros ir laiko kreivę.

Sumažintasis skerspjūvis – elemento skerspjūvis, imamas skaičiuojant konstrukcijų elgseną ugnyje ir taikant sumažintojo skerspjūvio metodą. Jis gaunamas iš liekamojo skerspjūvio atėmus tas skerspjūvio dalis, kurios laikomos netekusiomis stiprumo ir standumo.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	3
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	4
Padėka	5
1. TEMPERATŪROS ĮTAKOS BETONO KOMPONENTAMS, STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ	7
1.1. Cementinio akmens ir betono struktūra.....	7
1.1.1. Portlandcemenčio hidratacijos produktai ir struktūra	9
1.1.2. Cementinio akmens poringumas.....	12
1.1.3. Betono gamybai naudojami užpildai	13
1.1.4. Priedų ir cheminių įmaišų įtaka betono struktūrai	14

1.2. Aukštų temperatūrų įtaka betonui.....	17
1.2.1. Dehidratacijos procesai cementiniame akmenyje	17
1.2.2. Betono užpilduose vykstantys fizikiniai ir cheminiai procesai aukštose temperatūrose.....	20
1.2.3. Betono sprogstamoji irtis	21
1.3. Gelžbetonio atsparumo ugniai vertinimo charakteristikos	22
1.4. Apsauginio betono sluoksnio storio iki armatūros vertinimas.....	24
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	26
 2. TYRIMAMS NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR ATSPARUMO UGNIAI BANDYMŲ METODIKOS.....	 27
2.1. Medžiagos ir jų charakteristikos.....	27
2.2. Betono bandinių formavimas ir kietinimas.....	33
2.3. Vienpusis atsparumo ugniai bandymo metodas.....	36
2.4. Tūrinis atsparumo ugniai bandymo metodas.....	39
2.5. Cementinio akmens ir betono savybių vertinimas	41
2.5.1. Cementinio akmens ir užpildų termogravimetrinė ir infraraudonųjų spindulių spektroskopijos analizė	41
2.5.2. Betono savybių pokyčiai po kaitinimo	42
2.5.3. Betono dilatometrinė ir mikrostruktūros analizė.....	42
2.6. Tyrimų rezultatų statistinio apdorojimo metodika.....	43
2.7. Antrojo skyriaus išvados	43
 3. CEMENTO TIPO, UŽPILDŲ BEI ORO KIEKIO ĮTAKA BETONO IRIMO PROCESAMS VEIKIANT AUKŠTAI TEMPERATŪRAI	 45
3.1. Mineralinių priedų įtaka betono atsparumui ugniai.....	46
3.1.1. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais cementais esant vienpusiam temperatūros poveikiui.....	46
3.1.2. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais cementais esant tūriniam temperatūros poveikiui.....	50
3.1.3. Mineralinio priedo įtaka cementinio akmens destruktiniams procesams ...	52
3.1.4. Mineralinio priedo įtaka betono savybių pokyčiams veikiant aukštai temperatūrai	60
3.2. Užpildų įtaka betono atsparumui ugniai.....	63
3.2.1. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais užpildais esant vienpusiam temperatūros poveikiui.....	63
3.2.2. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais užpildais esant tūriniam temperatūros poveikiui.....	68
3.2.3. Destrukciniai procesai užpilduose veikiant aukštai temperatūrai	70
3.2.4. Užpildo mineralinės sudėties įtaka betono savybių pokyčiams veikiant aukštai temperatūrai.....	72
3.3. Įtraukto oro kiekio įtaka betono atsparumui ugniai.....	76
3.3.1. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingu oro kiekiu esant vienpusiam temperatūros poveikiui	76

3.3.2. Oro kiekio įtaka betono savybių pokyčiams veikiant aukštai temperatūrai	79
3.3.3. Betono su skirtingu oro kiekiu mikrostruktūros pokyčiai veikiant aukštai temperatūrai.....	83
3.3.4. Temperatūrinio režimo betone gaisro metu prognozavimas	87
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	90
BENDROSIOS IŠVADOS	93
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	95
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ...	103
SUMMARY IN ENGLISH.....	105
PRIEDAI ¹	121
A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	122
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	123
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	125

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Content

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
The relevance of the thesis	2
The object of the research	2
The aim of the thesis	2
The objectives of the thesis	2
Research methodology	3
The scientific novelty of the thesis	3
The practical value of the research finding	3
The defended statments	3
The approval of the research findings	4
The structure of the thesis	4
Acknowledgements	5
1. SCIENTIFIC RESEARCH ANALYSIS OF TEMPERATURE INFLUENCE ON CONCRETE COMPONENTS, STRUCTURE AND PROPERTIES.....	7
1.1. Structure of the hardened cement paste and concrete.....	7
1.1.1. Potland cement hydration products and structure	9
1.1.2. Porosity of hardened cement paste	12
1.1.3. Aggregates for concrete production	13
1.1.4. Influence of aditives and chemical admixtures on concrete structure.....	14
1.2. High-temperature influence on concrete	17
1.2.1. Dehydration processes in hardened cement paste	17

1.2.2. Physico and chemical processes in concrete aggregates at high temperatures.....	20
1.2.3. Explosive spalling in concrete	21
1.3. Evaluation parameters of reinforced concrete fire resistance	22
1.4. Evaluation of protective layer of concrete to reinforcement	24
1.5. Conclusions of first chapter and formulation of thesis objectives.....	26
 2. MATERIALS USED FOR TESTING AND FIRE RESISTANCE TESTING	
METHODOLOGIES.....	27
2.1. Materials and their characteristics	27
2.2. Preparation and hardening of concrete samples.....	33
2.3. One-sided fire resistance evaluation method.....	36
2.4. Volumetric fire resistance evaluation method	39
2.5. Evaluation of hardened cement paste and concrete properties	41
2.5.1. Thermogravimetric and infrared spectroscopy analysis of hardened cement paste and aggregates.....	41
2.5.2. Changes in concrete properties after heating	42
2.5.3. Dilatometrical and microstructure analysis of concrete	42
2.6. Method of statistical analysis of testing results	43
2.7. Conclusions of second chapter	43
 3. TYPE OF CEMENT, AGGREGATES AND THE AMOUNT OF AIR INFLUENCE ON CONCRETE EXPOSED TO ELEVATED HIGH TEMPERATURES	
FRACTURE PROCESSES	45
3.1. Influence of mineral additives on concrete fire resistance	46
3.1.1. Temperature distribution in concrete with different cements during one side heating	46
3.1.2. Temperature distribution in concrete with different cements during volumetric heating	50
3.1.3. Influence of mineral additives on hardened cement paste destruction processes.....	52
3.1.4. Influence of mineral additives on concrete changes in properties exposed to high temperatures	60
3.2. Influence of aggregates on concrete fire resistance	63
3.2.1. Temperature distribution in concrete with different aggregates during one side heating	63
3.2.2. Temperature distribution in concrete with different aggregates during volumetric heating	68
3.2.3. Destructive processes in aggregates exposed to high temperature	70
3.2.4. Influence of mineral composition of aggregates changes in properties in concrete exposed to high temperature	72
3.3. Influence of entrained air content on concrete fire resistance.....	76
3.3.1. Temperature distribution in concrete with different amount of air during one side heating	76

3.3.2. Influence of air content on concrete changes in properties exposed to high temperature	79
3.3.3. Microstructure changes in concrete with different air content exposed to high temperature.....	83
3.3.4. Prediction of temperature distribution in concrete during fire	87
3.4. Conclusions of third chapter.....	90
GENERAL CONCLUSIONS	93
REFERENCES	95
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	103
SUMMARY IN ENGLISH.....	105
ANNEXES ²	121
Annex A. Author declaration of academic integrity	122
Annex B. The co-authors' agreements for providing the materials of the joint publications in the thesis..	123
Annex C. Copies of the scientific publications by the author on the topic of the thesis....	125

² The annexes are provided in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Gelžbetoninių konstrukcijų gamybai gali būti naudojami įvairūs cementiniai betonai, kurie gali skirtis cemento tipu, užpildais ir cheminėmis įmaišomis. Tai daro įtaką betono mikrostruktūrai ir vykstantiems procesams aukštose temperatūrose. Betono struktūros ypatumai yra svarbūs vertinant betono atsparumą ugniai. Šiuo metu projektuojant gelžbetoninių konstrukcijų atsparumą ugniai nepakankamai atsižvelgiama į konstrukcijų gamybai naudojamo betono charakteristikas, gamybai naudojamas medžiagas bei sudėtį ir ypač į įtraukto oro kiekį betone.

Gelžbetoninių konstrukcijų atsparumas ugniai nustatomas pagal betono apsauginio sluoksnio storį iki armatūros, tačiau gelžbetoninėse konstrukcijose, kurioms keliama dideli atsparumo ugniai reikalavimai (kriterijus R 180), siekiant išvengti papildomų apsauginių sluoksnių reikalinga tiksliai įvertinti temperatūrinių laukų pasiskirstymą betono skerspjūvyje ir tinkamai parinkti tokio betono gamybai naudojamas medžiagas bei jo sudėtį.

Šiame darbe nagrinėjami skirtingo tipo cementų, įvairių užpildų bei oro kiekio įtaka betono atsparumui ugniai.

Darbo aktualumas

Vienas iš esminių statybinėms medžiagoms keliamų reikalavimų – atsparumas ugniai. Norint pagaminti efektyvias didelio atsparumo ugniai gelžbetonines konstrukcijas, būtina vertinti paties betono techninius pokyčius aukštose temperatūrose, tinkamai parinkti tokio betono žaliavas, komponentų kiekius jame, sukurti aukštoms temperatūroms atsparią betono mikrostruktūrą (optimizuoti betono poringumą). Darbo rezultatai taikytini atsparių gaisrui gelžbetoninių konstrukcijų projektavimui ir padidinto atsparumo ugniai cementinio betono gamybai.

Tyrimų objektas

Darbe tiriamas betono su skirtingais cementais, turinčiais skirtingus mineralinius priedus (aukštakrosnių šlako, klinties), skirtingais stambiaisiais užpildais (žvirgždų, granito skaldos, dolomito skaldos, keramzito) bei skirtingu įtraukto oro kiekiu atsparumas ugniai.

Darbo tikslas

Ištirti cemento esančių mineralinių priedų (aukštakrosnių šlako, klinties), skirtingų betono užpildų ir įtraukto oro kiekio betono mišinyje įtaką betono atsparumui ugniai.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Nustatyti aukštos temperatūros pagal standartinę gaisro kreivę paveiktų betonų su skirtingais cementais, užpildais ir įtraukto oro kiekiu temperatūrų pasiskirstymą betono skerspjuvyje ir aprašyti tai matematiškai.
2. Ištirti irimo procesus dėl temperatūrinio poveikio betone su skirtingais cementais bei užpildais.
3. Nustatyti betono su skirtingu įtraukto oro kiekiu mikrostruktūros bei fizikinių mechaninių savybių pokyčius veikiant aukštai temperatūrai.

4. Nustatyti naudotinas betono gamybai žaliavas bei reikiamą oro kiekį betono mišinyje projektuojant padidinto atsparumo ugniai betonines konstrukcijas.

Tyrimų metodika

Betono mišinių technologinių charakteristikų vertinimui naudoti standartiniai slankumo, tankio, oro kiekio nustatymo metodai. Sukietėjusiam betonui tirti naudoti gniuždymo stiprio, ultragarso impulso sklidimo greičio bandymų metodai. Betono temperatūrinių laukų išsidėstymui tirti naudoti vienpusio ir tūrinio atsparumo ugniai nustatymo metodai pagal standartinę gaisro kreivę. Cementinio akmens irimo procesams, skirtingiems užpildams ir betonui tirti buvo naudojami masės nuostolių, termogravimetrijos, infraraudonųjų spindulių spektroskopijos ir dilatometijos metodai. Mikrostruktūros pokyčiai betone buvo tiriami naudojant skenuojančią elektroninę mikroskopiją.

Darbo mokslinis naujumas

Atlikus tyrimus, gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Gauti temperatūros pasiskirstymo dėsningumai betonuose su skirtingais cementais, užpildais bei skirtingu įtraukto oro kiekiu aplinkos temperatūrai keičiantis pagal standartinę gaisro kreivę.
2. Nustatyta įtraukto oro kiekio betono mišinyje įtaka betono atsparumui ugniai ir efektyvus jo kiekis padidinto atsparumo ugniai betonuose.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pateikti praktiniai siūlymai dėl cemento tipo, užpildų ir cheminių įmaišų parinkimo projektuojant padidinto atsparumo ugniai betono sudėtis.

Gauti rezultatai naudotini apsauginio betono sluoksnio iki armatūros projektavimui norimo atsparumo ugniai gelžbetoninėse konstrukcijose pagal autoriaus siūlomas matematines lygtis.

Ginamieji teiginiai

1. Cemente esantis mineralinis priedas (aukštakrosnių šlakas), darantis įtaką adsorbuoto vandens kiekiui cementiniame akmenyje ir užpildo mineraluose

vykstantys kristalinės gardelės pokyčiai sukeliantys deformacinius procesus kaitinamame betone, daro neigiamą įtaką betono atsparumui ugniai.

2. Oro kiekio betono mišinyje padidinimas iki 5 % kompensuoja temperatūrinės deformacijas betone ir vandens garų migracijos sukeltą slėgį veikiant aukštai temperatūrai ir naudotinas betono atsparumo ugniai padidinimui.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbtos trys publikacijos užsienio mokslo žurnaluose, iš kurių dvi referuojamos duomenų bazėje *Scopus*.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiuose pranešimuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jocius V. 2011. Cementinio betono irimo mechanizmas veikiant aukštai temperatūrai, 14-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“.
- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2012. Cemento tipo įtaka betono atsparumui ugniai. Respublikinė konferencija „Medžiagų inžinerija 2012“.
- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2013. The Infuance of Cement Type and Different Types of Fillers on Fire Resistance of Concrete. Rygos technikos universiteto 54-oji tarptautinė mokslinė konferencija.
- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2013. Cemento tipo ir užpildų įtaka betono atsparumui ugniai. Respublikinė konferencija „Medžiagų inžinerija 2013“.
- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2014. Agregates Infuance on the Fire Resistance of Concrete. Rygos technikos universiteto 55-oji tarptautinė mokslinė konferencija.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir disertacijos autoriaus publikacijų sąrašai.

Darbo apimtis yra 103 puslapiai, neįskaitant santraukos anglų kalba ir priedų, tekste panaudotos 5 numeruotos formulės, 60 paveikslų ir 20 lentelių. Rašant disertaciją remtasi 108 literatūros šaltiniais.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju Varšuvos technikos universiteto Plocko filialo Chemijos instituto darbuotojams, vadovaujamiems prof. habil. dr. Barbaros Pacevskos už vertingus patarimus ir atliktus termogravimerijos bei infraraudonųjų spindulių spektroskopinius tyrimus mokslinės stažuotės metu.

Temperatūros įtakos betono komponentams, struktūrai ir savybėms mokslinių tyrimų analizė

Skyriuje analizuojami literatūros šaltiniai apie temperatūros įtaką betono komponentams, struktūrai ir savybėms. Nagrinėjama cementinio akmens struktūra, poringumas ir vykstantys procesai aukštose temperatūrose, betono gamybai naudojamų skirtingų užpildų savybės ir vykstantys fizikiniai – cheminiai procesai aukštose temperatūrose, bei gelžbetoninių konstrukcijų vertinimas atsparumo ugniai požiūriu.

Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Jocius *et al.* 2013; Jocius *et al.* 2014; Jocius, Skripkiūnas 2016).

1.1. Cementinio akmens ir betono struktūra

Cementinis akmuo yra poringas kūnas, kuriame didžiąją dalį kietosios fazės sudaro koloidinio dispersiškumo mikrokristalai, kurie suriša gana didelį kiekį vandens (Eisinas *et al.* 2009).

Betonas – kompozitas, susidedantis iš rišamosios medžiagos, užpildų, vandens bei priedų. Sumaišius cementą su vandeniu vyksta daugybė cheminių

reakcijų, kurios vadinamos cemento hidratacijos procesu. Kaitinant betoną vyksta cemento mineralų ir naujųjų dehidratacijos procesai, kurie ardo betono mikrostruktūrą (Skripkiūnas 2007).

Betonas yra konglomeratinės struktūros medžiaga sudaryta iš cementinės matricos ir užpildų. Konglomeratinė struktūra betone kartojasi keliais lygmenimis, tai yra betoną sudaro stambiaji užpildai, pasiskirstę skiedininės dalies matricoje. Skiedininę dalį sudaro smulkieji užpildai, pasiskirstę cementinėje tešloje arba sukietėjusiame cementiniame akmenyje, o cementinį akmenį sudaro cemento hidratacijos produktai (Skripkiūnas 2007).

Rišamosioms medžiagoms priskiriamas portlandcementis ir jo atmainos – šlakiniai ir pucolaniniai cementai bei aluminatinis cementas, plėtrusis cementas ir kiti. Priklausomai nuo cemento klinkerio mineralinės sudėties, priedų ir gaunamų cemento savybių gaminami įvairūs cementai. Išskiriami penki įprastinio cemento tipai: CEM I – portlandcementis, CEM II – sudėtinis portlandcementis, CEM III – šlakinis cementas, CEM IV – pucolaninis cementas ir CEM V – sudėtinis cementas. CEM I portlandcementį sudaro 95–100 % klinkeris, CEM II/A-S šlakinį portlandcementį sudaro 80–94 % klinkeris ir 6–20 % aukštakrosnių šlakas, CEM II /A-LL klinties portlandcementį sudaro 80–94 % klinkeris ir 6–20 % klintys, CEM III/B šlakinį cementą sudaro 20–34 % klinkeris ir 66–80 % aukštakrosnių šlakas (LST EN 197-1:2011).

Kita betono sudedamoji dalis yra užpildai. Smulkiuoju užpildu vadinamas toks užpildas, kurio stambiausios dalelės yra ne didesnės kaip 4 mm, o stambiuoju užpildu vadinamas toks užpildas, kurio stambiausios dalelės ne mažesnės kaip 4 mm ir smulkiausios dalelės ne mažesnės kaip 2 mm. Pagal kilmę užpildai skirstomi į: gamtinius, dirbtinius, iš pramonės atliekų bei iš antrinių žaliavų. Pagal stambiojo užpildo kiekį konglomeratai skirstomi į „plaukiojančios“ struktūros, kai stambusis užpildas atskirtas storais skiedininės dalies sluoksniais ir vienas su kitu nekontaktuoja, į kontaktinės struktūros, kai skiedininė dalis užpildo visas tuštumas tarp stambiojo užpildo, sudarydama nedidelio storio apvalkalus aplink stambiuosius užpildus ir stambiaporės struktūros, kai skiedininės dalies tūris mažesnis už tuštumų tūrį tarp stambiojo užpildo dalelių ir skiedinys tik padengia stambųjų užpildą plonu sluoksniu, o tuštumos tarp stambiojo užpildo lieka neužpildytos (Deltuva *et al.* 1982).

Vanduo arba vandeniniai tirpalai sudaro betono mišiniuose skystąją fazę. Dėl fizikinių ir cheminių procesų mišiniai, užmaišyti vandeniu, įgauna rišlumą ir tam tikras reologines savybes. Vanduo atlieka svarbų vaidmenį hidratacijos procesuose. Statybinių mišinių ruošimui vanduo turi atitikti tam tikrus reikalavimus, t. y. negali būti priemaišų, kurios sukelia sukietėjusio betono koroziją, organinių priemaišų, kurios lėtina rišiklių hidratacijos procesus, ribojamas chloridų, sulfatų, šarmų, fosfatų, nitratų kiekis, kuris sukelia betono sulfatinę arba šarminę betono korozijas (Deltuva *et al.* 1982).

Kietėjimo procesams reguliuoti arba technologinėms savybėms išgauti dedami priedai. Jie skirstomi į mineralinius ir chemines įmaišas. Cheminės įmaišos – tai cheminės medžiagos, kurių nedideli kiekiai į mišinius įmaišomi ruošimo metu. Pagal veikimo pobūdį cheminės įmaišos skirstomos į keletą grupių: reologines savybes reguliuojančios, rišimosi ir kietėjimo intensyvumą reguliuojančios, specialiosios, daugiav funkcinius priedus. Mineraliniai priedai – tai smulkiai sumaltos gamtinės uolienos arba pramonės atliekos, kurių dedama maišant mišinius, jie skirstomi į aktyviuosius priedus ir mikroužpildus (Žurauskienė *et al.* 2012). Išvardintos betono sudedamosios dalys yra svarbios projektuojant atitinkamas savybes turintį betoną.

1.1.1. Portlandcemenčio hidratacijos produktai ir struktūra

Portlandcemenčio kietėjimas vyksta vandens terpėje, prisotintoje kalcio hidroksido Ca(OH)_2 . Cemento mineralai su vandeniu sudaro naujus hidratuotus junginius. Svarbiausi produktai, susidarantys cemento hidratacijos metu yra trys (Balandis *et al.* 2004; Хекрацов 1957):

1. Kalcio hidrosilikatai (C-S-H).
2. Kalcio hidroksidas (CH).
3. Kalcio hidrosulfoaluminatas – trisulfatė (AFt) arba viensulfatė (AFm) forma.

Kalcio hidrosilikatų sudėtis priklauso nuo įvairių veiksnių, ypač nuo temperatūros ir Ca(OH)_2 koncentracijos tirpale. Dikalcio silikatui reaguojant su vandeniu susidaro kalcio hidrosilikatai, kaip ir trikalčio silikato hidrolizės metu, tačiau neišsiskiria Ca(OH)_2 . Hidratuojantis trikalčio aluminatui, formuojasi skirtingi kalcio hidroaluminatai, iš kurių stabilus yra $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Reaguodamas su vandeniu, tetrakalcio aliumoferitas hidrolizuoja ir susidaro kalcio hidroaluminatas $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ir kalcio hidroferitas $\text{CaO} \cdot \text{F}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Быт 1980). Kalcio hidroferitas toliau jungiasi su Ca(OH)_2 ir virsta didesnio bazingumo junginiu. Gipsas reaguoja su trikalčio aluminatu ir suformuoja trisulfatį kalcio hidrosulfoaluminatą $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$. Cemento mineralų hidratacijos greitis yra skirtingas. Greičiausiai hidratuoja trikalčio aliuminatas, po to tetrakalcio aliumoferitas, vėliau trikalčio silikatas (alitas), ir lėčiausiai hidratuoja dikalcio silikatas (belitas) (Хекрацов, К 1957).

Mokslininkai atliko portlandcemenčio tešlų su įvairiais katalizinio krekingo katalizatoriais ir lakiųjų pelenų mišinių pakaitalais termogravimetrines analizes. Katalizatoriaus kiekiai tyrime varijavo nuo 0–15 %, lakiųjų pelenų – nuo 0–30 %. Tešlos buvo išlaikomos nuo 3 iki 365 dienų. Termogravimetrinė analizė parodė, kad padidinus katalizatoriaus procentinį kiekį sistemoje, kalcio aluminato hidrato ir kalcio aliumosilicio hidrato taip pat padidėja. Lakiųjų pe-

lenų proporcijos didinimas nemodifikuoja cemento tešlose gautų hidratų tipų (Velazquez *et al.* 2016).

Mokslininkai tyrinėjo didelio stiprumo savarankiškai sutankinto betono, kuriame buvo TiO_2 nanodalelių ir industrinių pelenų, stiprumo ir ilgaamžiškumo charakteristikas. Jie nustatė, kad TiO_2 dalelėmis pakeitus cementą iki 4 %, buvo pagreitintas C–S–H gelio formavimasis dėl padidėjusio kristalinio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kiekio ankstyvoje hidratacijos stadijoje ir taip pagerinta betono struktūra, stiprumas ir ilgaamžiškumas (Jalal *et al.* 2013).

Hidratacijos pradžioje kalcio hidrosilikatų kristalai būna smulkūs, jų storis sudaro kelias molekules, nepastovus vandens kiekis gardelėje suteikia hidrosilikatui koloido savybių ir leidžia sudaryti lygiagrečias sąaugas bei sulaikyti didelį kiekį vandens. Silikato geliuose yra ne tik chemiškai surišto, bet ir didelis kiekis adsorbuoto vandens. Cementui kontaktuojant su vandeniu, cemento mineralai tirpsta, ir Ca^+ jonai išsiskiria tol, kol tirpalas pasiekia pusiausvyrą. Vėliau nusodinami jonai, ir susidaro kristalų hidratai, cementas ima kietėti (Teilor 1996).

Mokslininkai išskiria keturis portlandcemenčio formavimosi etapus (Teilor 1996; Gawin *et al.* 2006; Hertz 2003):

1. Cemento dalelės, patekusios į vandenį, pradeda tirpti.
2. Stambių cemento dalelių paviršiuje susidaro hidratacijos produktų sluoksnis. Smulkausios dalelės pavirsta hidratacijos produktų branduoliais. Cemento dalelės, pasidengusios hidratais, plečiasi, nes hidratų tūris yra didesnis už cemento miltelių tūrį.
3. Dėl plėtimosi mažesnieji branduoliai kontaktuoja su didžiųjų dalelių paviršiumi, taip įsiterpia ir sudaro klasterio struktūrą.
4. Toliau plečiantis klasteriai kontaktuoja išsiplėtusiose vietose ir sulimpa tarp savęs, sudarydami tiltelių struktūrą.

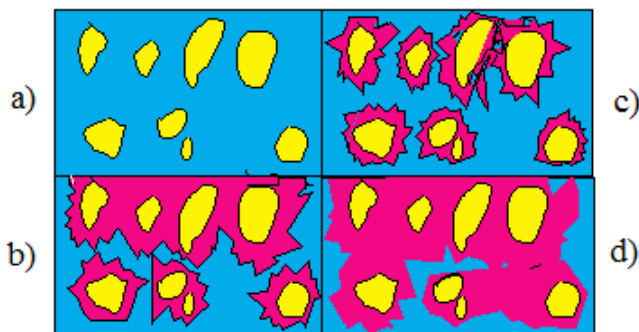
Hidratuojant cementui, vandens ir cemento tešloje išsiskiria šiluma, kuri įvairiais hidratacijos etapais yra skirtinga, tai pat skiriasi ir skirtingų markių cemento išskiriama hidratacijos šiluma.

Portlandcemenčio kietėjimo procesas trunka ilgai. Kietinant aukštesnėje temperatūroje kompozito stiprumas didėja kelis kartus greičiau ir gali pasiekti reikiamą stiprumą po 4–5 parų kietėjimo. Prie 100–110 °C temperatūros vyksta šutininimas, kuris žymiai paspartina hidratacijos procesus ir padidina cementinio akmens stiprumą. Stiprumas padidėja iki 150–180 % (Hung *et al.* 2001).

Portlandcemenčiui hidratuojant susidaro cementinis akmuo iš tokių mineralų: kalcio hidroksido, dikalcio hidrosilikato, kalcio hidrosulfoaluminato, kalcio hidroaluminato, kalcio hidroaliumoferito, nehidratuotų cemento mineralų.

Šie mineralai sudaro tankią ir stiprią cemento akmens struktūrą, susidedančią iš kristalinės ir gelinės struktūros medžiagos. 1.1 paveiksle pateiktas

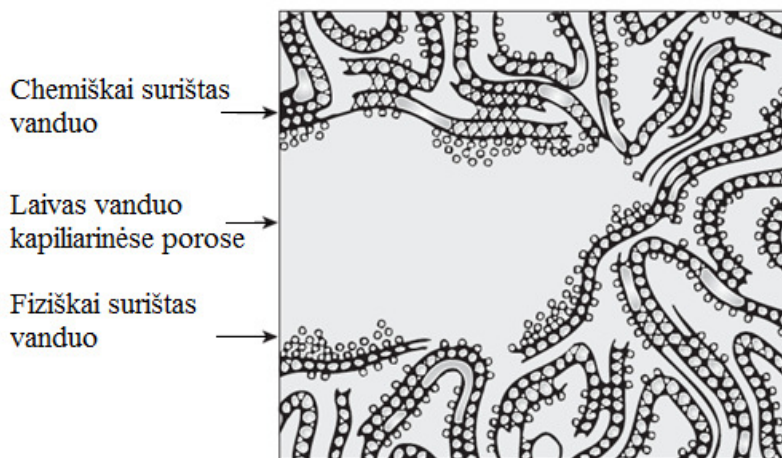
cemento akmens struktūros formavimasis hidratacijos metu (Khoshnazar *et al.* 2012).



1.1 pav. Portlandcemenčio akmens struktūros formavimasis hidratacijos metu: a) plastiška būklė; b) rišimasis; c) pradinė struktūra; d) galutinė struktūra (Khoshnazar *et al.* 2012)

Fig 1.1. Portland cement stone structure formation during a hydration: a) the plastic state; b) binding of cement paste; c) the primary structure; d) the final structure (Khoshnazar *et al.* 2012)

Cemento dalelėms reaguojant su vandeniu įvyksta reakcijos, kurių metu dalį vandens suriša fiziškai, chemiškai, o nes sureagavęs laisvas vanduo lieka didelėse kapiliarinėse porose. 1.2 paveiksle pateikta hidratuoto kalcio silikato vandens formų schema (Kumar *et al.* 2005).



1.2 pav. Hidratuoto kalcio silikato vandens formų schema (Kumar *et al.*, 2005)

Fig 1.2. Water forms scheme of hydrated calcium silicate (Kumar *et al.*, 2005)

1.1.2. Cementinio akmens poringumas

Cemento akmenyje yra labai įvairaus dydžio porų, kurių dydis skiriasi tūkstančius kartų. Poros pagal formą, dydį ir prigimtį gali būti skirstomos į tris grupes: kapiliarinės, gelio ir oro poros. Kapiliarinės poros suketėjusiam cemento akmenyje atsiranda išgaravus vandens pertekliui. Gaminant mišinį ir siekiant išgauti technologines savybes, vandens kiekis imamas didesnis, negu reikalingas cheminėms reakcijoms. Vandens perteklius pasiskirsto gelio porose ir tarpuose tarp nesureagavusių cemento dalelių ir hidratacijos naujadarų. Iš jų išgaravus laisvam vandeniui lieka kapiliarinės poros, kurios susisiečia viena su kita siaurais kanalais. Kapiliarinių porų skersmuo yra 0,1–10 μm , jų kiekis cemento akmenyje daugiausia priklauso nuo laisvojo vandens kiekio ir hidratacijos laipsnio. Didėjant V/C santykiui ir laisvojo vandens kiekiui cemento akmenyje, didėja kapiliarinių porų kiekis (Kalliopi 2006).

Cemento akmens kapiliarinis poringumas mažėja didėjant cemento hidratacijos laipsniui, nes susidarančio naujadarų gelio tūris apie 2,2 karto didesnis už nehidratavusio cemento tūrį, ir cemento hidratacijos produktai užima dalį vandeniui užpildyto tūrio (Skrupkiūnas 2007).

Gelio poros – tai tuštumos tobermoritiniame gelyje tarp šio gelio dispersinės fazės dalelių. Gelio poros daug smulkesnės už kapiliarines poras. Jų dydis yra 150–200 nm, jos apie 10 kartų didesnės už vandens molekulių dydį. Gelio porų kiekis cemento akmenyje didėjant hidratacijos laipsniui didėja, nes didėja paties gelio kiekis cemento akmenyje. Gelio poros labai smulkios, tačiau vandens pasišalinimas iš gelio porų sukelia cemento akmens susitraukimą ir valkšnumą. Oro poros cemento akmenyje yra stambiausios ir gali siekti iki kelių milimetrų dydžio. Jos yra uždarnos, jų forma artima sferai. Oro poros susidaro maišant mišinius. Oro kiekiui padidinti dedami specialūs orą įtraukiančios įmaišos. Įtraukto oro poros būna 50–200 μm dydžio ir yra daug stambesnės už kapiliarines poras. Jos mažina suketėjusio mišinio stiprumą, tačiau didina atsparumą šalčiui ir vandens nelaidumą (Kalliopi 2006).

Oro poros mišinyje susidaro maišant mišinį. Kietosios fazės paviršiuje esantis oras maišymo metu, pridėjus skystosios fazės į mišinį, uždaromas mišinyje. Šis oras vadinamas į mišinį įtrauktu oru. Tankinimo metu šis oras susikaupia ir sudaro paprastai sferinės formos uždaras poras. Oro kiekiui mišinyje padidinti naudojami specialios cheminės įmaišos. Oro kiekis mišinyje priklauso nuo užpildo stambumo – kuo smulkesni užpildai mišinyje, tuo didesnis įtraukto oro kiekis. Stambiagrūdžiuose mišiniuose oro kiekis būna apie 1–1,5 %, o smulkiagrūdžiuose siekia 5–6 %. Oro kiekis mišinyje turi neigiamą įtaką suketėjusio mišinio stiprumui, tačiau padidina jo atsparumą šalčiui (Kalliopi 2006).

Cemento akmens poringumas kinta didėjant cemento hidratacijos laipsniui. Didėjant cemento hidratacijos laipsniui, mažėja bendrasis ir kapiliarinis poringumas tačiau didėja gelio porų kiekis (Skripkiūnas 2007).

1.1.3. Betono gamybai naudojami užpildai

Užpildai – tai inertinis mišinių komponentas, kuris sudaro didžiąją mišinio tūrio dalį, net iki 95 %. Svarbiausia užpildų paskirtis – užpildyti tūrį mišinyje, sumažinti rišiklio kiekį ir pagerinti betono technines savybes (Skripkiūnas 2007; Naujokaitis 2007). Mokslininkas Xing įvardija, kad užpildas sudaro didžiąją dalį betone ir užima nuo 60 % iki 80 % tūrio. Nuo užpildo koncentracijos mišinyje priklauso betono struktūra ir savybės. Užpildai paprastai užpildo betono tūrį, o vienoks ar kitoks rišiklis, kurio tūris mišinyje paprastai būna kelis kartus mažesnis už užpildo tūrį, tik suriša betone užpildo daleles. Gaminant kompozitinius mišinius, būtina įvertinti komponentų savybes, užpildo daleles, formą, išsidėstymą, paviršiaus šiurkštumą ir kitas suketėjusio kompozito ilgamžiškumui įvertinti būtinas savybes. Dažnai siekiama gauti optimalios struktūros mišinį ir reikiamos kokybės betoną. Dažniausiai betone naudojami užpildai yra smėlis, žvirgždas, dolomito skalda, granito skalda ir lengvajam betonui – keramzitas (Naujokaitis 2006).

Smėlis yra smulkusis betono užpildas, kurio frakcijos dydis yra nuo 0 mm iki 4 mm dydžio. Smėlis yra nuosėdinė uoliena, turinti gana įvairią mineralinę sudėtį, daugiausiai kvarco. Dalelės būna įvairių formų: kampuotų, apzulinčių ir t. t. Cheminė smėlio sudėtis pateikta 1.1 lentelėje (Vonsavičius 1961).

1.1 lentelė. Cheminė smėlio sudėtis, %

Table 1.1. The chemical composition of the sand, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O(K ₂ O +Na ₂ O)	SO ₃	CO ₂	Kaitinimo nuostolis, %
93,36	3,74	0,42	0,48	0,50	1,58	0,02	0,34	0,26

Žvirgždas yra stambusis betono užpildas, kurio frakcijos dydis yra nuo 4 mm. Žvirgždas yra nuosėdinė uoliena, kuri kaip ir smėlis turi įvairią mineralinę sudėtį priklausomai nuo vyraujančių uolienų (Naujokaitis 2006).

Dolomitas yra karbonatų klasės kalcito grupės mineralas. Kristalai trigoninės singonijos, romboedro arba daugiakampio pavidalo. Būna įvairių atspalvių – nuo šviesiai pilkos iki tamsiai pilkos spalvos. Kietumas nuo 3,5 iki 4,0 pagal Moso skalę. Dolomituose CaCO₃ vidutiniškai yra 53,13 %, MgCO₃ – 38,52 %, SO₃ – iki 3,8 % (Naujokaitis 2006).

Granitas yra magminė intruzinė uoliena. Granitas kristalizuojasi iš aukštos temperatūros 600–700 °C lydalo žemės gelmėse, todėl mineralai suaugę siene-

lėmis ir labai sukibę – nepažeisto granito poringumas tesiekia 0,01 %. Jis sudarytas iš kvarco 20–40 %, feldšpato – ortoklazo 40–70 % ir žėručio – muskovito arba biotito 5–20 %. Dėl to granitas atsparus aukštos temperatūros poveikiui ir turi mažą vandens įgeriamumą (įgertis 0,2–0,5 %), yra praktiškai nelaidus vandeniui. Jo kietumas yra nuo 5,5 iki 7,0 pagal Moso skalę (Naujokaitis 2006).

Keramzitas – tai aukštoje temperatūroje degto molio granulės, kurios net keturis kartus lengvesnės už gamtoje randamus analogus. Karjere iškastas įvairių klodų molis maišomas, peršaldomas, džiovinamas, smulkinamas ir paduodamas į rutulinę krosnį. Joje, esant 1150 °C temperatūrai, molio žaliava išsipučia, suformuodama kietą išorinį paviršių ir porėtą vidaus struktūrą turinčias granules (Deltuva 1982, Naujokaitis 2006).

1.1.4. Priedų ir cheminių įmaišų įtaka betono struktūrai

Gerinant betono charakteristikas į betono sudėtį įmaišomi įvairūs priedai. Granuliuotų šlakų veikimas cementinėse sistemose yra toks pat, kaip pucolaninių priedų. Tačiau šlakai skiriasi nuo kitų pucolanų, nes jie patys savaime gali kietėti. Nustatyta, kad aukštakrosnių šlako, sumaišyto su portlandcemenčiu ir užpiltu vandeniu, hidratacijos pagrindinis produktas iš esmės lygiai toks pat, kaip ir portlandcemenčio, t. y. kalcio hidrosilikatas (C–S–H). Granuliuoto aukštakrosnių šlako hidratacijos produktai paprastai yra gelio pavidalo, priešingai negu portlandcemenčio. Tai irgi didina granuliuoto aukštakrosnių šlako cementinės tešlos tankumą. Granuliuoto aukštakrosnių šlako hidratacija portlandcemenčio aplinkoje didžiąja dalimi priklauso nuo stikliškos šlako struktūros išskaidymo ir ištirpymo hidroksilo jonais, išlaisvintais portlandcemenčio hidratacijos metu. Hidrolizuojantis granuliuotam aukštakrosnių šlakui, jis reaguoja su šarmais ir kalcio hidroksidu, sudarydamas papildomą kalcio hidrosilikatą (C–S–H). Aukštakrosnių šlakuose CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ir MgO suma sudaro nuo 90 % iki 95 % visos masės. Be to, juose šiek tiek yra MnO , FeO , CaS , FeS ir kitų oksidų bei sulfidų. Taigi, didelę šlakų dalį sudaro tie patys oksidai, kurie yra ir portlandcemenčio sudėtyje, tik čia yra kitoks jų kiekių santykis. Šlakiniam cementui yra būdingos šios savybės (Vektaris *et al.* 2006):

1. Hidratuojantis šlakiniam cementui, šilumos išsiskiria mažiau ir per ilgesnį laiko tarpą negu hidratuojantis portlandcemenčiui.
2. Šlakinis cementas vadinamas latentine hidrauline rišamąja medžiaga, nes jos hidratacijos periodas ir kietėjimo trukmė ištęsti. Jo stipruminės charakteristikos priklauso nuo kietėjimo parų skaičiaus ir kinta kitaip negu portlandcemenčio.
3. Atsparus sulfatų ir chloridų tirpalų poveikiui, nes beveik nėra trikalčio aluminato. Šiam cementui hidratuojantis, susidaro palyginti nedaug kalcio hidroksido, kuris dar reaguoja su šlaku. Dėl to šlakinio cemento

akmenyje, veikiamame sulfatų ir chloridų tirpalų, nesusidaro jį ardančių junginių.

4. Didesnis vandens nepralaidumas. Cementinis akmuo, susidaręs hidratuojantis tinkamai sumaltam šlakiniam cementui, yra tankus ir laikui bėgant dar tankėja, jame dominuoja smulkiausios poros. Kapiliarų potencialas auga mažėjant jų spinduliui, mažo spindulio kapiliarais vanduo ir kiti skysčiai pakyla į didesnę aukštį kuriose nesusidaro kapiliarinių jėgų. Dėl to skiediniai ir betonai su šlakiniu cementu yra nepralaidūs vandeniui ir įvairiems druskų tirpalams.

Mokslininkai (Pundienė 2000; Demirel *et al.*, 2010) tyrinėjo betoną su aluminatiniu cementu ir SiO_2 mikrodulkėmis. Nustatė, kad didinant SiO_2 mikrodulkių kiekį rišiklio sudėtyje, smarkiai padidėja V/C santykis. Tai rodo, kad mikrodulkės adsorbuoja vandens perteklių. Nuo mikrodulkių kinta rišimosi pradžios ir pabaigos laikas. Į mišinį įmaišius 1% SiO_2 mikrodulkių, rišimosi pradžia fiksuojama 150 min. Įmaišius 3,2 % mikrodulkių, rišimosi pradžia fiksuojama 600 min. Gniuždymo stipris priklauso nuo SiO_2 mikrodulkių kiekio ir kietėjimo trukmės. Po 2–3 parų kietėjimo silpniausias bandinys su didžiausiu SiO_2 mikrodulkių kiekiu, tačiau po 6–7 parų kietėjimo tokie bandiniai įgauna didžiausią gniuždymo stiprį (Pundienė 2000). Mokslininkas pastebėjo, kad betoną veikiančią temperatūrą padidinus nuo 400 °C iki 800 °C, ultragarso sklaidimo greitis sumažėja dvigubai – nuo 3800 km/s iki 1800 km/s (Demirel *et al.*, 2010).

Mokslininkas tyrinėjo natrio silikato (skystas stiklas) ir jo tirpalo įtaką kaitrai atsparaus betono savybėms. Nustatyta, kad nuo skystojo stiklo tankio priklauso bandinio išsiplėtimas. Prie 500–600 °C temperatūros pastebėta, kad mažesnis skystojo stiklo tankis mažiau išplečia medžiagą. Šios reakcijos vyksta dėl kietėjimo metu nsureagavusio rišiklyje skystojo stiklo plėvelių išsipūtimo. Terminis patvarumas kinta nuo natrio silikato kiekio betone. Mažinant kiekį nuo 6,5 % iki 3,7 %, terminis patvarumas padidėja nuo 13 iki 20 terminių ciklų, o jų liekamasis stipris siekia 79–87 % (Antonovič 1999).

Mokslininkas tyrinėjo polipropileno ir metalo plaušų įtaką didelio stiprumo betonuose aukštesiose temperatūrose. Bandymams panaudotas portlandcementis CEM I, kurio stiprumo klasė 52,5, užpildas, superplastiklis „Cimfluid 2002“, propileno ir metalo plaušas. Buvo pagaminti 4 tipų bandiniai: be papildomų plaušų, su polipropileno plaušais, su metalo plaušais ir su metalo ir polipropileno plaušais. Nustatyta, kad masės nuostolis temperatūros intervale nuo 300 °C iki 600 °C kinta tolygiai, tačiau betonuose su polipropileno plaušais yra didesnis. Mechaninės stiprumo savybės betono su polipropileno ir metalo plaušais yra blogesnės už betono su metalo plaušais, tačiau geresnės už betono be plaušų (Pliya 2011).

Deflokuliantai, kurie vadinami ir plastikliais, ir dispergatoriais, o apibendrintai – reologijos modifikatoriais, naudojami kaitrai atspariuose betonuose jų reologinėms charakteristikoms pagerinti. Šie priedai turi įtakos betono sklidumui, klojumui, leidžia sumažinti vandens poreikį. Kai kurie deflokuliantai daro įtaką cemento hidratacijai, betono tankiui, poringumui ir stiprumui (Martinez-Ramirez 2001).

Kinų mokslininkų Sun Bei ir Lin Zhixiang darbe analizuotas ultra aukšto stiprumo betono atsparumas skilinėjimui greitai kaitinant ir greitai šaldant. Eksperimentuojant buvo nustatyta įvairių priedų kiekio įtaka staigiam šio betono skilinėjimui aukščiau minėtomis sąlygomis. Proceso mechanizmas buvo tiriamas išsamia termine ir rentgeno difrakcijos analize bei elektroniniu mikroskopu ir gyvsidabrinio porometru. Tyrėjai nustatė, kad plieninio plaušo priemaišos prailgino trūkimo laiką, bet neįtakojo betono atsparumo pleišėjimui. Atsparumas pleišėjimui padidėjo pridėjus polipropileno (PP) ar plieno ir (PP) pluošto. Nustatyta, kad 0,2 % (nuo tūrio) PP pluošto priedas (12 mm ar 19 mm ilgio) labai padidina betono atsparumą pleišėjimui. Pagrindinė teigiamo efekto priežastis yra pluošto formuojami cilindriniai kanalai (Bei *et al.*, 2016).

Dispersinės betono komponentų dalelės gali turėti neigiamą arba teigiamą elektros krūvį. Vienodą krūvį turinčios dalelės viena kitą atstumia, o skirtingos viena kitą traukia. Deflokuliantų veikimas grindžiamas vandens ir cemento bei dispersinių dalelių sistemos jėgų tarp dalelių pakeitimu. Šis mechanizmas nėra iki galo išaiškintas. Minimieji elektrostatinis, erdvinis ir kapiliarinis efektas bei jų deriniai (Martinez-Ramirez 2001).

Kaitrai atspariems betonams gaminti naudojami įvairūs deflokuliantai: proteinais, lignosulfonatai, melamino–formaldehido dervos, naftaleno sulfonatai, natrio polifosfatai ir poliakrilatai, turintys neigiamą elektros krūvį. Jų veikimas – elektrostatinis dispergavimas, potencialo perstūmimas į neigiamą sritį. Kai betone susidaro pradinių cemento hidratų, tokio tipo deflokuliantai praranda plastifikavimo efektą. Todėl šiuolaikinėse technologijose yra taikomi nauji deflokuliantai, kurie cemento ir vandens sistemoje sukelia dvigubą efektą – elektrostatinį bei erdvinį. Jų veikimas efektyvesnis, nes nesulimpa cemento dalelės. Šiai grupei priskiriami polikarboksilato eteriai (Goberis *et al.*, 2007).

Orą įtraukiančios įmaišos didina oro kiekį mišinyje ir sudaro smulkių sferinių oro porų tinklą. Šios įmaišos didina sukietėjusio mišinio atsparumą šalčiui. Oro įtraukimas į mišinį vyksta mišinio maišymo metu. Orą įtraukianti įmaiša tik stabilizuoja oro burbuliukus, susidariusius mišinio maišymo metu. Mišinyje be orą įtraukiančios įmaišos oro burbuliukai greitai susijungia į stambesnius ir pasišalina iš mišinio tankinimo metu. Orą įtraukianti įmaiša – tai paviršiaus aktyvinančios medžiagos, kurios absorbuojasi oro ir vandens paviršiuje. Paviršių aktyvinanti medžiaga sumažina paviršiaus įtempį dujinės ir skystosios fazės paviršiuje, taip apsaugo oro burbuliukus nuo susijungimo ir

padidina jų stabilumą. Orą įtraukianti įmaiša įmaišoma į mišinius kartu su vandeniu labai nedideliais kiekiais 0,3–1,0 ml vienam kilogramui rišiklio masės. Orą įtraukianti įmaiša pagerina ir betono mišinio technologines savybes: padidina mišinio plastiškumą, sumažina sluoksniavimąsi ir vandens atsiskyrimą (Skripkiūnas 2007).

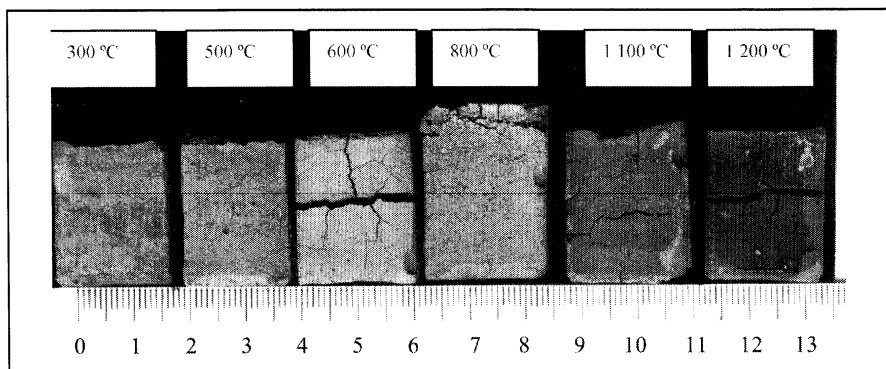
1.2. Aukštų temperatūrų įtaka betonui

1.2.1. Dehidratacijos procesai cementiniame akmenyje

Veikiant portlandcemenčio akmenį aukštoms temperatūroms, Ca(OH)_2 kristalohidratai, kurių dydis siekia 10 nm, kaitinami praranda vandenį ir pasikeičia į CaO kristalus, kurių būdingasis dydis yra 10^{-3} nm (Vydra *et al.* 2001).

Kalcio oksido savitasis paviršius didelis, todėl jis iš aplinkos prisisotina drėgmės ir pakartotinai hidratuojasi. Antros hidratacijos metu Ca(OH)_2 tūris padidėja 44 %. Toks reiškinys sukelia visišką cementinio akmens irimą (Shui *et al.* 2009).

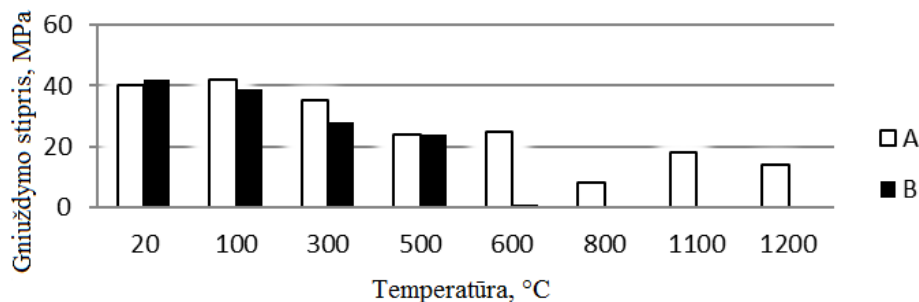
Mokslininkai S. Goberis ir V. Antonovič atliko tyrimus. Bandymams buvo panaudotas portlandcementis (CEM I 42,5). Vandens ir cemento santykis 0,25. Cementiniai bandiniai kietėjo 7 paras normaliomis sąlygomis, vėliau buvo degti įvairiose temperatūrose nuo 300 °C iki 1200 °C ir laikomi 3 paras drėgnomis sąlygomis. Bandiniai suyra juos išdegus 600 °C temperatūroje ir palaikius 3 paras drėgnomis sąlygomis (Goberis *et al.*, 2007) (1.3 pav.).



1.3 pav. Portlandcemenčio bandiniai po degimo ir išlaikymo 3 paras drėgnomis sąlygomis (Goberis *et al.*, 2007)

Fig 1.3. Portland cement samples after combustion and maintenance for 3 days in humid conditions (Goberis *et al.*, 2007)

Bandinius išdegus aukštose temperatūrose ir apsaugojus juos nuo drėgmės poveikio iš aplinkos gaunami kitokie rezultatai. Bandiniai nesuyra, tačiau jų gniuždymo stipris sumažėja (1.4 pav.).



1.4 pav. Portlandcemenčio akmens gniuždymo stipris: A – iškaitintas temperatūroje ir apsaugotas nuo drėgmės; B – iškaitintas temperatūroje ir išlaikytas 3 paras drėgnomis sąlygomis (Goberis *et al.*, 2007)

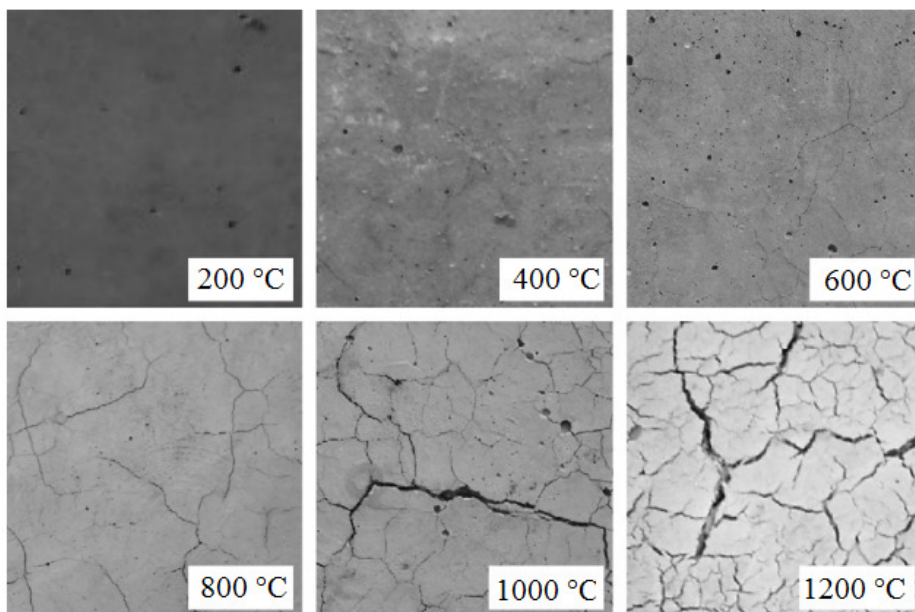
Fig. 1.4. Portland stone compressive strength: A – calcined in temperatures and protected from moisture; B – calcined in temperatures and maintained 3 days in wet conditions (Goberis *et al.*, 2007)

Pateiktame 1.4 paveiksle matome, kad betono bandinius paveikus 500 °C temperatūra, gniuždymo stipris mažėja apytiksliai dvigubai nuo pradinio stiprio, ir laikymo aplinka po kaitinimo neturi didelės įtakos. Tačiau, betoną paveikus 600 °C temperatūra, atsiranda žymūs skirtumai, susiję su laikymo sąlygomis po bandymų. Bandiniai praranda gebą atlaikyti apkrovas dėl įvykusio antirinio hidratacijos proceso, tai yra susidariusio CaO reakcijos su vandeniu. Virš 500 °C temperatūros betone pasireiškia žymūs destruktiniai procesai dėl aukščiau minėtų priežasčių. Cementinis betonas visiškai praranda stiprumą paveiktas 500 °C temperatūra (Goberis *et al.* 2007).

Mokslininkai (Castellote *et al.* 2004) atliko tyrimus su skirtingais portlandcemenčiais, kurių skirtingas trikalcio aluminato C_3A kiekis. Pirmasis bandinys turėjo $C_3A > 9\%$, antrasis $C_3A < 1\%$. Bandiniai išlaikomi 28 paras normaliomis sąlygomis. Vėliau buvo kaitinami iki 620 °C ir normaliomis sąlygomis atvėsunami. Tyrimo rezultatai patvirtina aukščiau aprašytą mechanizmą, kad portlanditas $Ca(OH)_2$, pasiekęs 530–560 °C, skyla ir susidaro kalcio oksidas (CaO). Vėliau aušimo metu kalkės iš aplinkos absorbuoja vandenį ir vėl hidratuoja. Antrą kartą hidratuotas portlanditas yra mažiau kristalizavęsis nei pradinis, ir jo terminio skilimo temperatūra tampa mažesnė. Bandiniuose su trikalcio aluminato kiekiu $C_3A > 9\%$ užfiksuotas mažesnis portlandito suirimas lyginant su trikalcio aluminato kiekiu $C_3A < 1\%$, kai cementinis akmuo suyra visiškai.

Mokslininkas (Arioz 2007) ištyrė keturis skirtingos sudėties betonų skirtingose temperatūrose. Bandymams naudojo portlandcementį, kurio sudėtis

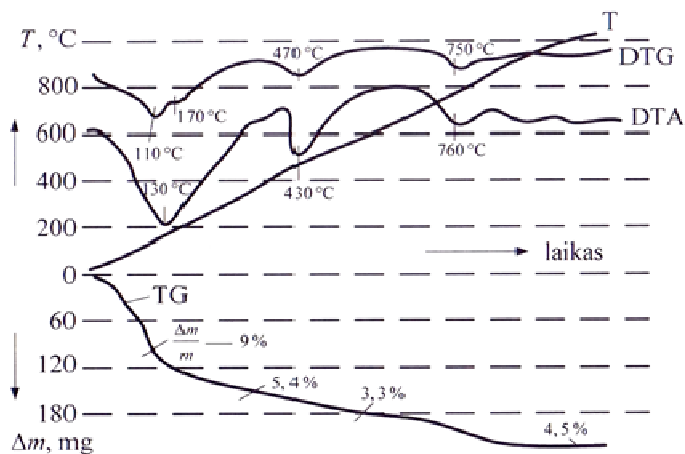
C_3S – 38,95 %, C_2S – 30,55 %, C_3A – 9,91 %, C_4AF – 11,98 %. Užpildui panaudojo susmulkintą kalkakmenį ir upės žvirgždą, kurio didžiausios dalelės siekė 15 cm. Bandymams buvo paruošti $70 \times 70 \times 70$ kubiniai bandiniai, kurie 28 paras laikomi vandenyje, vėliau 6 paras džiovinami aplinkos temperatūroje ir vieną parą laikomi krosnelėje prie $105^\circ C$. Bandiniai kaitinami ir išlaikomi norimoje temperatūroje 2 valandas. Temperatūros kilimo greitis $20^\circ C/min$. Fiksuojamas paviršiaus pleišėjimas (1.5 pav.), masės nuostoliai ir gniuždymo stipris. Masės nuostoliai iki $800^\circ C$ didėja tolygiai iki 10 %. Nuo $800^\circ C$ iki $1200^\circ C$ betono masės nuostolis didėja greitai ir siekia 40 %. V/C santykis masės nuostoliams įtakos neturi. Gniuždymo stipris prie $800^\circ C$ sumažėja 60 %, prie $1200^\circ C$ temperatūros bandinys suyra.



1.5 pav. Paviršiaus įtrūkimai prie skirtingų temperatūrų (Arioz 2007)

Fig. 1.5. Surface cracking with different temperatures (Arioz 2007)

1.6 paveiksle pateikta cementinio akmens termograma. Analizuojant šios termogramos kreives galima padaryti išvadą, kad pirmasis ($130^\circ C$ temperatūros) endoeftas apibūdina adsorbcinio vandens pašalinimą iš gelio pavidalo kalcio hidrosilikatų ir etringito, $170^\circ C$ temperatūros endoeftas apibūdina heksagonalinio hidroaluminato suirimą, $470^\circ C$ temperatūros endoeftas apibūdina kalcio hidrosilikatų dehidrataciją ir pasiektas $760^\circ C$ temperatūros endoeftas apibūdina kalcio karbonato disociaciją. TG kreivė rodo masės nuostolius yrant cheminiais junginiais (Šiaučiūnas *et al.* 2007).



1.6 pav. Cementinio akmens termograma (Šiaučiūnas et al. 2007)

Fig. 1.6. Thermogram of cement stone (Šiaučiūnas et al. 2007)

Mokslininkas (Monteagudo *et al.* 2014) nagrinėjo cementinės tešlos hidratacijos laipsnį su skirtingais priedais. Bandymai atlikti su aukštakrosniu šlaku, pelenais, silicio mikrodulkėmis. Pateikiamos išvados, kad termogravimetija galima kiekybiškai nustatyti hidratacijos laipsnį pagal chemiškai surišto vandens santykį su portlanditu.

Termogravimetrijos metodas buvo pritaikytas betono lydymosi temperatūrai nustatyti. Mokslininkas (Hojae *et al.*, 2016) nagrinėjo betoną su skirtingais užpildais. Jis tyrė betoną su bazaltu, kalkakmeniu, silicio užpildu ir nustatė, kad betonai su bazalto užpildu lydomi prie 1377 °C, su kalkakmeniu prie 1295–1427 °C priklausomai ar smulkus, ar stambus pasirinktas užpildas. Šie tyrimai bus pritaikyti atominių reaktorių pagrindų gamybai.

1.2.2. Betono užpilduose vykstantys fizikiniai ir cheminiai procesai aukštose temperatūrose

Betono gamybai visais atvejais naudojamas smulkusis užpildas, kuris dažniausiai atveju būna smėlis. Smėlis yra nuosėdinė uoliena, turinti gana įvairią mineralinę sudėtį, daugiausiai kvarco. Kvarcas yra silicio dioksido mineralas, kuris prie 573 °C temperatūros deformuojasi ir keičia kristalinę gardelę iš betą į alfą, taip didindamas savo tūrį 1,5 %, kaitinamas 870 °C temperatūroje kvarcas virsta tridimitu ir dar padidina tūrį (Deltuva *et al.* 1982).

Mokslininkas (Arioz 2007) atliko tyrimus su paprastu portlandcemenčiu, panaudojant užpildus – trupintą kalkakmenį ir upės žvirgždą. Betono bandinius paveikė temperatūra nuo 200 °C iki 1200 °C. Mokslininkas pastebėjo, kad paveikus 600 °C temperatūra, bandiniai vizualiai sutrūkinėjo, paveikus 800 °C

temperatūra, bandiniai žymiau sutrūkinėjo, paveikus betono bandinius 1200 °C temperatūra, bandiniai visiškai suiro. Aukštose temperatūrose bandiniai su upės žvirgždu vertinant stiprumines savybes pasirodė blogiau. Mokslininkas (Xing *et al.*, 2015) iš Prancūzijos nagrinėjo termofizikines užpildų savybes veikiant temperatūrai. Jis atliko bandymus su kvarcitu, titnagu ir kalkakmeniu. Taip pat teigia, kad užpildo mineralinė sudėtis labai įtakoja betono šiluminį laidumą. Bazaltas turi mažą pralaidumą, klintys ir dolomitas vidutinį, kvarcas ir smiltainis aukštesnį pralaidumą. Mokslininkai įvardina nerūdinių iškasenų šiluminį laidumą nuo 1 W/mK iki 9 W/mK (Marshall 1972; Khan *et al.* 1995; Zoldners 1971).

1.2.3. Betono sprogstamoji irtis

Kaitinant betoną galimas sprogstamasis efektas. Mokslininkai (Matesova *et al.* 2006; Mindeguia *et al.* 2010; John *et al.* 2013) teigia, kad sprogstamasis efektas galimas prie žemesnių kaip 200 °C temperatūrų. Kiti autoriai (Hertz 2003; Kumar *et al.* 2006) įvardina temperatūras nuo 200–350 °C. Gawin ir kt., kad sprogstamasis efektas pasireiškia esant tokiai temperatūrai (Gawin *et al.* 2006).

Didelio stiprumo betonas turi didesnę tendenciją sproginėti, nei normalaus stiprumo betonas. Anderberg nurodo, kad paviršiaus trūkinėjimas didėja didėjant betono drėgnumui, betono nepralaidumui, išorinės apkrovos gniuždymui, temperatūros greičiui, nesimetrinės temperatūros pasiskirstymui. Betono sprogstamoji irtis yra susijusi su vandens garų slėgiu betone. Kaitinant betoną laisvasis vanduo kaista ir garuoja, nesant sąlygų vandeniui išgaruoti (uždaros poros) atsiranda didelis slėgis (Anderberg 1997).

Autoriai Phan ir Carino pateikia tokias išvadas (Phan *et al.* 1998):

- betono sproginėjimas vyksta prie 200–325 °C temperatūros;
- išankstinė apkrova sušvelnina sproginėjimą;
- betono bandiniai su mažesniu V/C santykiu turėjo didesnę potencialą sproginėti nei bandiniai su didesniu V/C santykiu. Tačiau, kai bandymai buvo pakartoti esant švelnesnėms sąlygoms, sprogstamoji irtis pastebėta tik bandiniuose su didesniu V/C santykiu. Bandiniai, pagaminti su V/C 0,57, išvis netrūkinėjo išbandant visomis sąlygomis;
- SiO₂ mikrodulkės neturėjo žymios įtakos bandinių sproginėjimui.

Mokslininko Mindeguia straipsnyje įvardinamos priežastys (Mindeguia *et al.* 2010):

- betono vandens laidumas stipriai įtakoja vandens skverbimosi greitį kaitinimo metu;
- užpildo terminis nestabilumas padidina atskirų fragmentų atsiradimo galimybę;

- porų slėgi betone sukelia vandens garai. Maksimalus slėgis labai priklauso nuo betono mišinio sudėties. Mažas betono pralaidumas sudaro sąlygas didelio slėgio atsiradimui porose. Tai seka ir iš P. Laplaso viršslėgio lygties, priklausomai nuo porų ir kapiliarų spindulių verčių (Мачюлайтис 1997).

1.3. Gelžbetonio atsparumo ugniai vertinimo charakteristikos

Gaisrinės saugos pagrindiniai reikalavimai nurodo, kad kilus gaisrui turi būti apribota rizika žmonių saugai, visuomeniniam ir kaimynų turtui bei aplinkai (LR įsakymas Nr. 1-338 2011).

Rengiant ir projektuojant statinio konstrukcijas, reikia įvertinti konstrukcinės sistemos elgseną veikiant gaisro temperatūroms, galimą šilumos poveikį ir teigiamas aktyvių bei pasyvių apsaugos priemonių poveikį gaisro metu. Laikančios konstrukcijos be gaisro atskyrimo funkcijų turi būti projektuojamos taip, kad atlaikymo funkcija R (geba atlaikyti apkrovas) būtų pakankama. Konstrukcijose, kurios projektuojamos gaisro atskyrimo funkcijai užtikrinti, turi būti vertinamas kriterijus E (sandarumas), neturi atsiverti plyšiai, susidaryti skylės, kad gaisro sąlygomis neuždegtų konstrukcijos iš neveikiamos pusės ir taip ribotų gaisro plitimą (Jonaitis *et al.* 2005). Gaisro metu patalpoje temperatūra gali pakilti iki 1200 °C, pramoniniuose pastatuose ir dar aukščiau. Tokia aukšta temperatūra gali išsilaikyti iki 3 valandų ir ilgiau. Veikiant pastato konstrukcijas tokia aukšta temperatūra ir ilgą laiką, konstrukcijos smarkiai pažeidžiamos. Pažeistos konstrukcijos gali nebeatlaikyti apkrovų, arba jų tolimesis eksploatavimas tampa neįmanomas. Siekiant sumažinti gelžbetoninių konstrukcijų pažeidimus gaisro metu, būtina tinkamai įvertinti gaisro metu vyraujančius procesus. Gelžbetoninių konstrukcijų analizė gaisro metu yra svarbi projektavimo dalis, tačiau elementų elgsena gaisro metu yra labai sudėtinga. Skaitiniams metodams reikia daug kompiuterinių išteklių, todėl jų taikymas yra ribotas netgi sudėtingomis gelžbetoninių konstrukcijų skaičiavimo programomis (Gribniak *et al.* 2006). Gelžbetonis yra kompleksinė medžiaga ir jo komponentai – betonas ir plienas – į aukštą temperatūrą reaguoja skirtingai. Siekiant tiksliau atlikti vertinimus, reikalinga atskirai vertinti betono ir plieno fizines bei mechanines savybes.

Betoną paveikus aukšta temperatūra kinta jo savybės: tankis, gniuždymo stipris, išauga plastinės deformacijos, keičiasi specifinė betono šiluma ir šilumos laidumas (Eurokodas 2-1-2:2005).

Armatūrinių plienų takumo aikštelė, didėjant temperatūrai, mažėja. Pasiekus 300 °C temperatūrą ji visiškai pradingsta. Dauguma plienų, naudojamų

gelžbetoninėse konstrukcijose, yra plastiški. Įkaitintos plieninės armatūros mechaninės savybės blogėja. 200–350 °C temperatūroje S240 klasės armatūra šiek tiek sustiprėja, prie 400 °C temperatūros stiprumas ir takumo riba stipriai sumažėja, tačiau išauga plastiškumas. Plieninės armatūros su legiruotais plienais S600, S800 elgiasi labai panašiai kaip ir angliniai plienai, jų takumo riba taip pat mažėja (Eurokodas 2-1-2:2005).

Veikiant gelžbetoninę konstrukciją aukštai temperatūrai, betonas traukiasi, o plieninė armatūra, turėdama didesnę plėtimosi koeficientą, plečiasi. Tokioje kompozicijoje susidaro priešingos jėgos, kurios eigoje betonas su armatūra gali prarasti sukibtį. Kylant temperatūrai betono ir armatūros sukibtis mažėja, esant 100 °C temperatūrai lygaus paviršiaus armatūra su sunkiuoju betonu praranda 25 % sukibties. Sunkiojo betono sukibtis su karštai valcuota rumbuota armatūra prie 350 °C temperatūros yra didesnė, tačiau pasiekus 450 °C temperatūrą yra prarandama 25 % sukibtis (Ильин 1979).

Standarto LST EN 13369:2013 „Bendrosios surenkamų betoninių gaminių taisyklės“ 4.3.punktas numato, kad atsparumas ugniai pagal gaisro plitimo parametrus gali būti vertinamas pagal apskaičiavimo metodus, pateiktus LST EN 1992-1-2 (Eurokodas 2), arba pagal bandymus.

Mokslininkai (Bamonte *et al.* 2015) savo straipsnyje pažymi, kad betono elgsena aukštoje temperatūroje išsamiai tiriama nuo 1970 m., siekiant išskirti pagrindines problemas, susijusias su jo mechaninėmis savybėmis aukštos temperatūros sąlygomis, pavyzdžiui, vykstant cheminiams procesams, kinematinei elgsenai (trumpalaikės ir dėl valkšnumo kylančios deformacijos) bei fizikinių-mechaninių savybių evoliucijai. Šių tyrimų dėka literatūroje apie betono elgseną aukštoje temperatūroje buvo pateikti esminiai modeliai/fizikinio proceso aprašymo modeliai, siekiant pademonstruoti galimą gelžbetonio konstrukcijos elgseną ją kaitinant. Atsižvelgiant į šį kontekstą, naudojant FORTRAN uždavinių sprendimo priemonę bei GID kaip parengiamąją ir baigiamąją sistemą, buvo sukurtas Sijos baigtinio elemento metodas termomechaninėms analizėms atlikti. Skaitiniu būdu buvo sumodeliuota daug kruopščiai sudokumentuotų išsamių bandymų su gelžbetoninėmis kolonomis, paveiktomis standartinio gaisro, įgyvendinant keturis skirtingus esminius modelius apie betono elgseną aukštoje temperatūroje, siūlomus literatūroje. Pagrindiniai tikslai: pabrėžti kai kurių itin svarbių aspektų vaidmenį gelžbetoninių elementų elgsenai karštos būsenos sąlygomis, ypač antrinį poveikį, trumpalaikę ir dėl valkšnumo kylančią deformaciją ir atlikti sisteminį palyginimą tarp skaitinių ir eksperimentinių rezultatų, siekiant įvertinti ir 1D skaitinio modeliavimo, ir jau pasirinktų esminių betono modelių patikimumą. Gauti rezultatai patvirtina, kad 1D skaitinis modeliavimas iš esmės atitinka eksperimentinius duomenis, jei atsižvelgiama į trumpalaikes ir dėl valkšnumo kylančias deformacijas, taip pat į antrinį po-

veikį. Be to, skirtumai tarp tirtų keturių modelių, demonstruojančių betono elgseną gniuždymo atveju, yra gana nedideli.

Mokslininkai bandymo metu tyrė deformavimo greičio poveikį aukštesne temperatūra paveikto didelio stiprumo betono elgseną. Betono prizmės buvo kaitinamos iki 20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ir 800 °C temperatūros. Įkaitintos prizmės buvo paveiktos ašine apkrova, deformacijos greitis 10^{-5} s^{-1} , ir atitinkamai dviem pakartotiniais seisiniais smūgiais dinamiu deformavimo greičiu 10^{-3} ir $0,067 \text{ s}^{-1}$. Bandymų rezultatai rodo, jog kuo aukštesnė temperatūra ir deformavimo greitis, tuo daugiau bus įtrūkimų ir nuotrupų. Tiek liekamasis gniuždymo stipris, tiek tamprumo modulis mažės kylant temperatūrai. Be to, maksimalią deformaciją sustiprina padidintos temperatūros, tačiau labai ženkliai įtakoja deformavimo greitis. Nustatytas santykis tarp įtempio ir deformacijos bei dinamiško apkrovimo faktoriaus (Jianzhuang *et al.* 2016).

Jei atlikdami terminę analizę nenorime nuvertinti žalos, kurią gaisro atveju tunelio betoninei dangai padaro sukelta aukšta temperatūra, svarbu įvertinti skerspjūvyje prarandamą betono dangą. Šiame tyrime skaitinės analizės būdu, taikant elementų pašalinimo modelį bei kombinuoto šilumos perdavimo koeficientą, imituojamas konstrukcijos nuostolis. Buvo atlikta gaisro bandymų serija naudojant standartinio gaisro kreives, kurios skyrėsi pradinės temperatūros gradientu bei maksimalia temperatūra. Optimizuoto kombinuoto šilumos perdavimo koeficiento vertės paimtos iš sutapusių skaitinės analizės rezultatų bei eksperimentų metu gautų duomenų. Rezultatai atskleidžia, kad tiek pradinės temperatūros gradientas, tiek maksimalios temperatūros didėjimas sukelia didelę žalą betoninėms konstrukcijoms. Taip pat gali įtakoti šilumos perdavimo koeficiento padidėjimą. Konstrukcijos betono nuostolio atveju kombinuoto šilumos perdavimo koeficiento vertės galima nustatyti iš pradinės temperatūros gradiento bei maksimalios temperatūros verčių. Nepriklausomai nuo to, ar patirtas betono konstrukcijos nuostolis, ar ne. Iš rezultatų buvo išvestos dvi regresijos lygtys. Kalbant apie tikslų pastebėtų rezultatų imitavimą, siūlomas terminės analizės metodas, kuris pranašesnis lyginant su tradiciniu metodu (Soo-Ho *et al.* 2016).

1.4. Apsauginio betono sluoksnio storio iki armatūros vertinimas

Elementams veikiant gaisro temperatūrai skaičiuoti taikomi keli metodai (Eurokodas 2-1-2:2005):

- projektavimas naudojantis lentelių duomenimis;
- paprastieji skaičiavimo metodai (taikomi tik tam tikriems elementams, veikiant tik lenkimo momento ir ašinėms jėgoms).

Paprastuoju skaičiavimo metodu nustatoma kaitinamojo skerspjuvio laikomoji geba. Šis metodas taikomas konstrukcijoms, paveiktoms standartine gaisro kreive iki didžiausios gaisro temperatūros. Šiuo metodu vertinamas temperatūrinių laukų pasiskirstymas pjūviuose, betono ir armatūros stipris, tampumo modulis. Apskaičiuojama laikomoji geba įvertinus sumažintą skerspjuvį. Elementai turi būti suprojektuoti taip, kad neatplyštų apsauginis betono sluoksnis, nesuirėtų dėl sprogstamojo betono irimo, nepasižeistų armatūros inkaravimo vietos (Jonaitis *et al.* 2005).

Mokslininkai (Ibanez *et al.*, 2015) straipsnyje nagrinėja realistinio skerspjuvio temperatūros prognozavimo metodą bei supaprastintas apvalaus skerspjuvio, betonu užpildytų vamzdinių kolonų, veikiamų ašine apkrova elgsenos ugnyje skaičiavimo metodą. Jie teigia, kad labai trūksta paprastų pasiūlymų, kaip apskaičiuoti betonu užpildytų vamzdinių kolonų temperatūros pasiskirstymo laukus, kai vertinamas jų atsparumas ugniai. Netgi Eurokodas 4-1-2, kuris nurodo vieną iš labiausiai naudojamų kompozicinių kolonų elgsenos ugnyje skaičiavimo metodų, nepateikiama jokių nuorodų projektuotojams, kaip skaičiuoti skerspjuvių temperatūrą. Įvertinant, jog tam būtina turėti veikiantį metodą, šiame straipsnyje pateikiamos lygtys, padėsiančios apskaičiuoti temperatūros pasiskirstymą apvaliose, užpildytose įprastinio stiprumo betonu kolonose. Gauti praktinės išraiškos rezultatai. Antroje darbo dalyje nagrinėjamas ašine apkrova veikiamų ašies kryptimi apkrautų kolonų elgsenos ugnyje skaičiavimo metodo vystymas, remiantis bendrosiomis Eurokodo 4-1-1 dalyje nustatytomis taisyklėmis bei pasitelkiant bendrą supratimą apie betono šerdies skerspjuviui ekvivalentišką kambario temperatūros koncepciją. Siekiant pateikti paprastas formules, atlikta daugialypė netiesinės regresijos analizė, kuriai buvo panaudoti termomechaninių parametrų analizės būdu gauti skaitiniai rezultatai. Prognozuojami rezultatai dar kartą palyginami su gautomis eksperimentinėmis vertėmis bandymų metu, užtikrinant pagrįstą tikslumą.

Norint tiksliai prognozuoti atsparumą ugniai, ypatingai svarbu tiksliai prognozuoti skerspjuvio temperatūras betonu užpildytuose plieno tuščiaiduriuose profiliuose. Nors su betonu užpildytais plieno kolonomis buvo atlikta daug terminių bei konstrukcinių bandymų, yra keletas, kurie pateikia pilną ataskaitą apie skerspjuvio šilumos lauko parametrų profilį, tačiau šie modeliai nepatvirtinti. Mokslininkai (Rush D. *et al.* 2015) nustatė, kad: dėl Eurokodo gairių galima smarkiai pervertinti skerspjuvio temperatūras; siūlomos naujos terminio modeliavimo prielaidos trijose pagrindinėse srityse; ir priešgaisrinės elgsenos ugnyje skaičiavimo gairės yra labai konservatyvios.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Betonas su mineraliniais priedais bei cheminėmis įmaišomis yra kompozitinė medžiaga, kurioje yra skirtingų hidratacijos produktų ir struktūrų, todėl vertinti gaminių atsparumą ugniai yra labai sudėtinga.
2. Didžiąją tūrio dalį betone sudaro užpildai, kurie daro įtaką betono elgsenai veikiant aukštai temperatūrai. Užpilde esantis kvarco mineralas prie 573 °C temperatūros keičia savo kristalinės gardelės struktūrą iš β į α , kvarco tūris padidėja apie 1,5 %, o prie 870 °C temperatūros kvarcas virsta tridimitu, jo tūris dar padidėja. Užpilduose esantys karbonatai (CaCO_3 ir MgCO_3) 650–800 °C temperatūros intervale dekarbonizuojasi susidarant CaO ir CO_2 , pasireiškiant dideliems masės nuostoliams.
3. Oro įtraukiančios cheminės įmaišos gali reguliuoti porų struktūrą ir vidinius betono įtempius užšaldymo metu. Lig šiol nebuvo nagrinėjama oro kiekio įtaka betono intensyviu kaitinimui iki aukštų temperatūrų, t. y. atsparumui ugniai.
4. Projektuojant gelžbetonines konstrukcijas pagal šiuo metu galiojančius standartus, atsparumas ugniai vertinamas pagal apsauginio sluoksnio storį, neatsižvelgiant į betono charakteristikas.

Apibendrinus kitų autorių tyrimus ir norint nustatyti cemento tipo, užpildų ir oro kiekio mišinyje įtaką betono atsparumui ugniai reikia išspręsti disertacijoje tokius uždavinius:

1. Nustatyti skirtingų cementų, užpildų ir įtraukto oro kiekio įtaką temperatūrų pasiskirstymui kaitinamo betono skerspjūvyje.
2. Ištirti irimo procesus dėl temperatūrinio poveikio betone su skirtingais cementais bei užpildais.
3. Nustatyti oro kiekio betono mišinyje įtaką betono mikrostruktūros bei fizikinių mechaninių savybių pokyčiams veikiant aukštai temperatūrai.
4. Atlikti temperatūrinio režimo betone gaisro metu prognozavimą ir nustatyti naudotinas betono gamybai žaliavas bei reikiamą oro kiekį betono mišinyje.

Tyrimams naudotos medžiagos ir atsparumo ugniai bandymų metodikos

Šiame skyriuje aprašomos tyrimams naudotos medžiagos ir bandiniai, jų paruošimas, apžvelgiami visi bandymų metodai ir bandymų įranga, kurie buvo naudoti tiriant betono ir cementinio akmens atsparumą ugniai.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta dvejuose straipsniuose (Jocius *et al.* 2013; Jocius *et al.* 2014) ir pristatyta keturiuose mokslinėse konferencijose.

2.1. Medžiagos ir jų charakteristikos

Bandymams naudotas portlandcementis su skirtingais mineraliniais priedais: CEM I 42,5 R (be priedų, smulkiai maltas), CEM I 42,5 N (be priedų), CEM II/A-LL 42,5 N (su 17 % klinčių priedu), CEM II/A-S 42,5 N (su 17 % aukštakrosnių šlako priedu), CEM III/B 32,5 N (su 70 % aukštakrosnių šlako priedu), gamintojas AB „Akmenės cementas“. Cementai atitinka standarto LST EN 197-1:2011 reikalavimus. Gamintojo deklaruojama portlandcemenčio klinkerio cheminė ir mineralinė sudėtis pateikta 2.1 lentelėje, cemento mechaninės ir fizikinės savybės 2.2 lentelėje.

2.1 lentelė. Portlandcemenčio klinkerio cheminė ir mineralinė sudėtis**Table 2.1.** Portland cement clinker chemical and the mineral composition

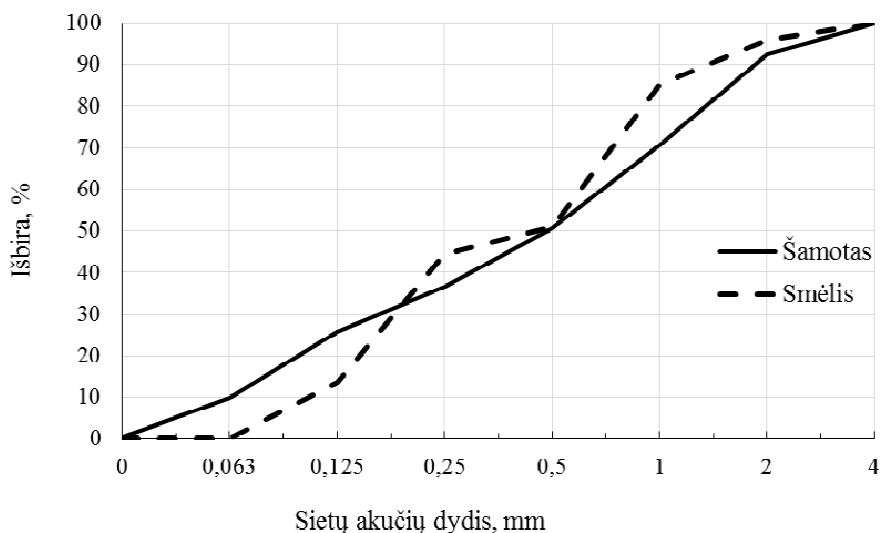
Cheminė sudėtis	Kiekis, %	Mineralinė sudėtis	Kiekis, %
SiO ₂	20,48	C ₃ S	56,60
Al ₂ O ₃	5,55	C ₂ S	15,76
Fe ₂ O ₃	3,58	C ₃ A	8,59
CaO	63,13	C ₄ AF	10,85
SO ₃	0,73	–	–
Cl ⁻	0,002	–	–
MgO	3,99	–	–
CaO _{laisvo}	0,86	–	–

2.2 lentelė. Cemento mechaninės ir fizikinės savybės**Table 2.2.** Cement mechanical and physical properties

Cemento savybės	CEM I 42,5N	CEM I 42,5R	CEM II /A- LL 42,5N	CEM II/A-S 42,5N	CEM III/B 32,5N-LH
Gniuždymo stipris po 2 parų, MPa	22±3	28±2	21±3	22±3	–
Gniuždymo stipris po 28 parų, MPa	50±3	54±3	47±3	51±3	41±3
Rišimosi pradžia, min	160	160	190	160	220
Rišimosi pabaiga, min	–	–	–	–	315
Tūrio pastovumas, mm	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Vandens sąnaudos, %	24,3	25,1	25,0	25,3	30,3
Liekana ant sieto 90 µm, %	3,5	1,5	4,3	2,9	0,3
Savitasis paviršius, cm ² /g	3500	3700	3600	3500	5000

Smulkiajam užpildui buvo naudotas šamotas frakcija 0/4 ir gamtinis smėlis frakcija 0/4. Šamotas buvo naudotas, kaip termiškai stabilus užpildas atliekant cemento su skirtingais mineraliniais priedais tyrimus.

Šamotas „Grade –Bos 125“ iš Lenkijos įmonės T–Ozmo. Gamintojo deklaruojami parametrai: frakcija 0/4, naudojimo temperatūra 1250 °C, šamoto mineralinę sudėtį sudaro aliumosilikatiniai junginiai, Al_2O_3 kiekis 29 %, įgeriamo vandens kiekis 10–12 %. Granulimetriniai tyrimų rezultatai pateikti 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Šamoto ir smėlio granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.1. The granulometric composition of chamotte and sand

Smėlis (UAB „Poškų karjeras“, Poškų k., Agluonėnų sen., Klaipėdos r.), tenkinantis LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. Gamintojo deklaruojami smėlio fizikinių savybių rodikliai (2.3 lentelė), jo cheminė (2.4 lentelė) bei granulimetrinė sudėtis pateikta 2.1 paveiksle.

Smėlio mineralinė–petrografinė sudėtis: kvarcas – 60,4 %, lauko špatai – 12,1 %, karbonatai – 15,9 %, žėrutis – 0,1 %, tamsieji mineralai – 4,0 %, kristalinės uolienos 7,5 %.

2.3 lentelė. Smėlio fizikinės savybės

Table 2.3. Sand physical properties

Charakteristika	Frakcija	Vidutinė vertė
Dalelių tankis, kg/m^3	0/4	2649
Vandens įmirkis, %	0/4	0,59
Piltinis tankis, kg/m^3	0/4	1669

2.4 lentelė. Cheminė smėlio sudėtis**Table 2.4.** The chemical composition of the sand

SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	CaO, %	MgO, %	Kaitinimo nuostolis, %
77,87	4,86	0,98	6,84	0,45	5,35

Žvirgždas (UAB „Poškų karjeras“, Poškų k., Agluonėnų sen., Klaipėdos r.), tenkinantis LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. Gamintojo deklaruojami žvirgždo fizikinių savybių rodikliai bei granulimetrinė sudėtis pateikta 2.5 lentelėje ir 2.2 paveiksle.

Žvirgždo mineralinė–petrografinė sudėtis: granitas – 29,4 %, dioritas – 2,3 %, gabras – 2,0 %, porfyras – 1,9 %, kvarcas – 3,0 %, lauko špatai – 1,2 %, pilkasis smiltainis – 1,5 %, klintis – 32,7 %, dolomitas – 26,0 %.

2.5 lentelė. Žvirgždo frakcija 4/16 fizikinių ir mechaninių savybių rodikliai**Table 2.5.** The data of gravels fraction 4/16 physical and mechanical properties

Charakteristika	Frakcija	Vidutinė vertė
Dalelių tankis, kg/m ³	4/16	2670
Vandens įmirkis, %	4/16	1,30
Piltinis tankis, kg/m ³	4/16	1597
Atsparumas trūpinimui, %	10/14	19

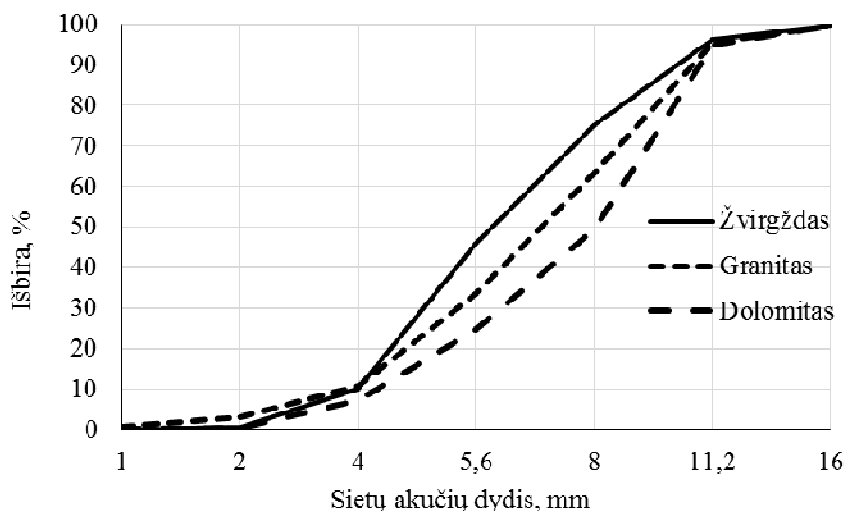
**2.2 pav.** Žvirgždo, granito skaldos, dolomito skaldos granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.2. The granulometric composition of gravel, crushed granite and crushed dolomite

Granitinė skalda iš UAB „Granitinė skalda“, Granito g. 2, Vilnius. Frakcija 4/16. Gamintojo deklaruojami granitinės skaldos fizikinių ir mechaninių savybių rodikliai pateikti 2.6 lentelėje, granulimetrinė sudėtis 2.2 paveiksle.

Granito mineralinė–petrografinė sudėtis: kvarcas – 23,4 %, feldšpatai – 54,7 % (pilkieji plagioklazai 45 % ir kalio feldšpatai 55 %), biotitas – 21,9 %.

2.6 lentelė. Granitinės skaldos frakcija 4/16 fizikinių ir mechaninių savybių rodikliai

Table 2.6. The data of granite rubble fraction 4/16 physical and mechanical properties

Charakteristika	Frakcija	Vidutinė vertė
Dalelių tankis, kg/m ³	4/16	2667
Vandens įmirkis, %	4/16	1,37
Piltinis tankis, kg/m ³	4/16	1440
Atsparumas trūpinimui, %	10/14	20

Dolomitinė skalda iš UAB „Dolomitas“, Dolomito g. 6, Petrašiūnų k., Pakruojo r. frakcija 4/16. Gamintojo deklaruojami dolomitinės skaldos fizikiniai ir mechaniniai savybių rodikliai pateikti 2.7 lentelėje, granulimetrinė sudėtis 2.2 paveiksle.

Dolomito mineralinė–petrografinė sudėtis: dolomitas – 98,6 %, molis/mergelis – 1,4 %.

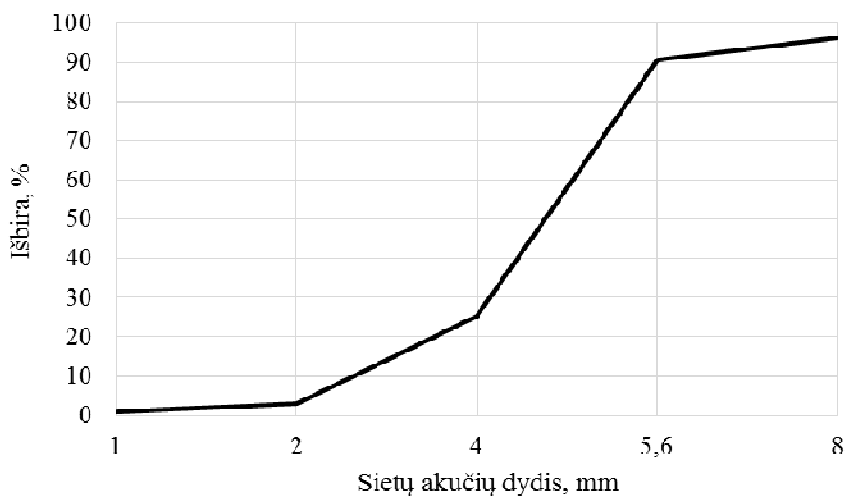
2.7 lentelė. Dolomitinės skaldos frakcija 4/16 fizikinių ir mechaninių savybių rodikliai

Table 2.7. The data of dolomite rubble fraction 4/16 physical and mechanical properties

Charakteristika	Frakcija	Vidutinė vertė
Dalelių tankis, kg/m ³	4/16	2771
Vandens įmirkis, %	4/16	1,7
Piltinis tankis, kg/m ³	4/16	1530
Atsparumas trūpinimui, %	4/16	20

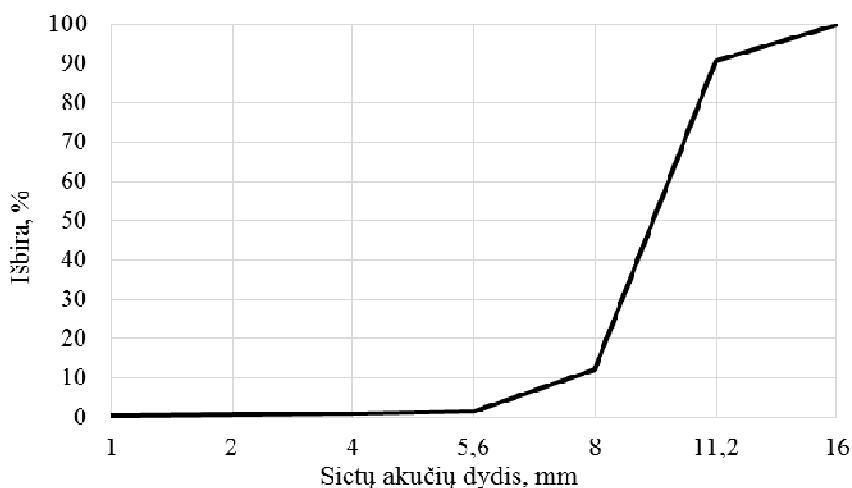
Keramzito žvyro frakcijos 4/8 ir 8/16 iš AB „Palemono keramika“, Pamaro g. 1, Kaunas. Gamintojo deklaruojami rodikliai: fr. 4/8 piltinis tankis 500–600 kg/m³, dalelių tankis 2155 kg/m³, vandens įgertis iki 20 %; fr. 8/16 piltinis tankis 500–600 kg/m³, dalelių tankis 2185 kg/m³, vandens įgertis iki 15 %. Keramzito žvyro granulimetrinė sudėtis, pateikta 2.3 ir 2.4 paveiksluose.

Keramzito mineralinę sudėtį sudaro kristaliniai aliumosilikatai tokie kaip silimanitas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), mulitas ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), plagioklazai ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albitas) iki $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anortito)) ir kiti.



2.3 pav. Keramzito žvyro (frakcija 4/8) granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.3. The granulometric composition of expanded clay aggregate (fraction 4/8)



2.4 pav. Keramzito žvyro (frakcija 8/16) granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.4. The granulometric composition of expanded clay aggregate (fraction 8/16)

Superplastiklis „Dynamon Xtend“, sudarytas iš modifikuotų akrilinių polimerų, galima įmaiša 0,3–2,0 % pagal cemento masę, tankis 1,06 g/cm³, pH – 6,5, gamintojas Mapei, Norvegija.

Orą įtraukianti įmaiša „Rebalit LP“, galima įmaiša 0,2–0,6 % pagal cemento masę, tankis – 1,01 g/cm³, pH 10±1, gamintojas Remei Baltica OÜ, Estija.

2.2. Betono bandinių formavimas ir kietinimas

Išbandytos betono sudėtys pateikiamos 2.8–2.10 lentelėse. Betono stiprumo klasė C35/45, kuri tinkama laikančiosioms konstrukcijoms gaminti.

2.8 lentelėje pateikiama betono mišinių sudėtys, kurios buvo naudojamos cemento priedų įtakai tirti. Tyrimai atliekami su cementu be priedų, su smulkiai maltu cementu, su turinčiu 17 % klinties priedo, su turinčiu 17 % ir 70 % šlako priedo. Vandens ir cemento santykis lygus 0,93.

2.8 lentelė. Betono mišinio sudėtys (medžiagų kiekiai 1 m³) cemento esančių mineralinių priedų įtakai tirti

Table 2.8. The quantities of 1 m³ concrete mixtures for cement additives influence investigation

Sudėtis žymuo	Cementas, kg					Šamotas fr. 0/4, kg	Plastiklis, kg	Vanduo, kg
	CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 R	CEM II/A–LL 42,5 N	CEM II/A–S 42,5 N	CEM III/B 32,5N–LH			
C1N (be priedų)	323	–	–	–	–	1896	6,4	300
C1R (smulkiai maltas)	–	323	–	–	–	1896	6,4	300
C2L (17 % klinties priedas)	–	–	323	–	–	1896	6,4	300
C2S (17 % šlako priedas)	–	–	–	323	–	1896	6,4	300
C3 (70 % šlako priedas)	–	–	–	–	323	1896	6,4	300

2.9 lentelėje pateikiama betono mišinio sudėtis ir kiekiai, kurie buvo naudoti užpildo įtakai tirti. Tyrimai atlikti su žvirgždu, dolomito skalda, granito skalda ir keramzito užpildais.

2.9 lentelė. Betono mišinio sudėtys (medžiagų kiekiai 1 m³) užpildo įtakai tirti

Table 2.9. The quantities of 1 m³ concrete mixtures for aggregate influence investigation

Sudėties žymuo	Cementas, kg		Užpildas, kg						Plastiklis, kg	Vanduo, kg
	CEM I 42,5 N	CEM II A-LL 42,5 N	Smėlis , fr 0/4	Žvirgždas, fr. 4/16	Granito skalda, fr. 4/16	Dolomito skalda, fr. 4/16	Keramzito žvyras			
							fr. 4/8	fr. 8/16		
U1Ž (žvirgždas)	331	–	856	1020	–	–	–	–	3,31	149
U1G (granitas)	331	–	856	–	1020	–	–	–	3,31	149
U1D (dolomitas)	331	–	856	–	–	1020	–	–	3,31	149
U1K (keramzitas)	331	–	856	–	–	–	92	112	3,31	149
U2Ž (žvirgždas)	–	331	856	1020	–	–	–	–	3,31	149
U2G (granitas)	–	331	856	–	1020	–	–	–	3,31	149
U2D (dolomitas)	–	331	856	–	–	1020	–	–	3,31	149
U2K (keramzitas)	–	331	856	–	–	–	92	112	3,31	149

2.10 lentelėje pateikiama betono mišinio sudėtis ir kiekiai, kurie buvo naudoti įtraukto oro kiekio įtakai tirti. Tyrimai atlikti su skirtingomis septyniomis sudėtimis. Pirmos penkios sudėtys sumaišytos su 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,6 % ir be orą įtraukiančios įmaišos. Gautas oro kiekis betono mišinyje be oro įtraukiančios įmaišos 3,2 %, su 0,1 % orą įtraukiančia įmaiša 4,0 %, su 0,2 % orą įtraukiančia įmaiša 5,0 %, su 0,3 % orą įtraukiančia įmaiša 10,0 %, su 0,6 %

orą įtraukiančia įmaiša 14,0 %. Norint gauti betoną su vienodu gniuždymo stipriu buvo padidintas cemento kiekis. Padidinus cemento kiekį ir įdėjus 0,3 % orą įtraukiančios įmaišos, gautas oro kiekis betone yra 8,5 %, su 0,6 % gautas oro kiekis siekė 12,0 %.

2.10 lentelė. Betono mišinio sudėtys (medžiagų kiekiai 1 m³) įtraukto oro kiekio įtakai tirti

Table 2.10. The quantities of 1 m³ concrete mixtures for amount of air influence investigation

Sudėties žymuo	Cementas, kg	Užpildas, kg		Plastiklis, kg	Orą įtraukianti įmaiša, %	Vanduo, kg
	CEM II A-LL	Smėlis, fr. 0/4	Dolomito skalda fr. 4/16			
O (įtraukto oro 3,2 %)	331	856	1020	3,31	0	149
O-01 (įtraukto oro 4,0 %)	331	856	1020	3,31	0,1	149
O-02 (įtraukto oro 5,0 %)	331	856	1020	3,31	0,2	149
O-03 (įtraukto oro 10,0 %)	331	856	1020	3,31	0,3	149
O-06 (įtraukto oro 14,0 %)	331	856	1020	3,31	0,6	149
O-03P (įtraukto oro 8,5 %)	460	856	1020	4,6	0,3	149
O-06P (įtraukto oro 12,0 %)	520	856	1020	5,2	0,6	149

Eksperimentams buvo formuojami betono kubeliai, kurių matmenys 100 mm × 100 mm × 100 mm. Betono mišinio slankumas buvo nustatytas pagal standartą LST EN 12350-2, tankis – pagal LST EN 12350-6, oro kiekis mišinyje naudojant slėginį metodą pagal – LST EN 12350-7. Betono kubeliai prieš bandymus buvo išlaikomi 28 paras vandenyje, kurio temperatūra 20 ± 2 °C. Kiekvienos partijos bandinių buvo pagaminta po 12 vnt. Po tris bandinius buvo paimta gniuždymo stipriui nustatyti po 28 parų. Betono bandinių gniuždymo stipris nustatytas pagal – LST EN 12390-3:2009. Tankis nustatytas remiantis standarto LST EN 12390-7:2009 reikalavimais.

2.3. Vienpusis atsparumo ugniai bandymo metodas

Vienpusio atsparumo ugniai bandymo metodui naudoti suformuoti skirtingų mišinių betono kubeliai, kurių matmenys (100×100×100) mm. Keturios kubelio briaunos buvo izoliuotos mineraline vata, kitos dvi neizoliuotos. Viena neizoliuota kubelio briauna buvo nukreipta į krosnies vidų ir veikiamą aukštos temperatūros pagal standartinę gaisro kreivę. Įrangos vaizdas ir bandinio nuotrauka iš veikiamos temperatūra pusės pateikta 2.5 paveiksle.



a)



b)

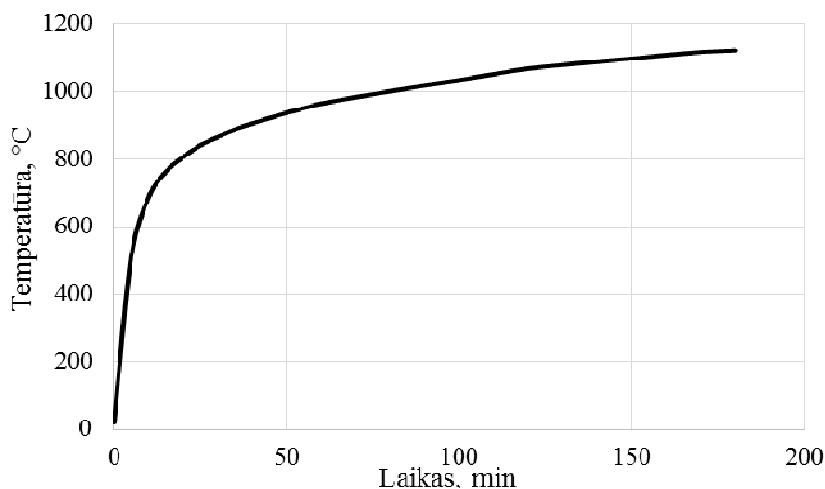
2.5 pav. Bandymų įrangos ir bandinio vaizdas: a) krosnelė su temperatūros registratoriumi; b) bandinys iš veikiamos temperatūra pusės

Fig. 2.5. Test equipment and sample image: a) oven with temperature recorder; b) sample image from the exposed to temperature side

Vienpusio atsparumo ugniai kaitinimo kamera sudaryta iš plieninio karkaso, ant kurio iš 2 mm storio nerūdijančio plieno lakštų suformuota (200×200×50) mm dydžio kaitinimo kamera. Iš vienos pusės kaitinimo kamera izoliuota aukštomis temperatūroms atsparia šiltnamąja izoliacija. Kaitinimo kamerai šildyti buvo naudojami 8 vnt. 32A13/0,7T220 tipo vamzdiniai elektriniai kaitinimo elementai, kurių kiekvieno galingumas buvo 0,7 kW, skersmuo – 13 mm, o ilgis – 200 mm. Visi kaitinimo elementai sujungti lygiagrečiai. Eksperimento principas – kaitinti bandinį iš vienos pusės, kaip numatyta standarte LST EN 1363-1:2012 pagal reglamentuotą temperatūros–laiko priklausomybę. Temperatūros kilimas krosnyje turi atitikti šią priklausomybę:

$$T - T_0 = 345 \lg_{10} (8t + 1), \quad (2.1)$$

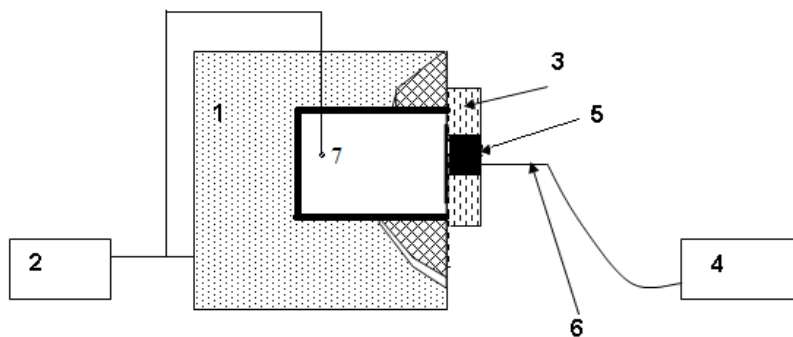
čia t – laikas, min; T – krosnies temperatūra, pasiekta per laiką t , °C; T_0 – pradinė krosnies temperatūra, °C.



2.6 pav. Standartinė gaisro kreivė (ISO 834)

Fig. 2.6. Standard fire curve (ISO 834)

Bandymui atlikti anksčiau aprašyta įranga užtikrina pasirinktą šiluminį režimą. Keliamos temperatūros svyravimo ribos siekė 1–16 °C. Be abejo, temperatūros pasiskirstymui konstrukcijos skerspjūvyje turi įtakos ir konstrukcijos paviršiui tenkantis šiluminis poveikis bei šio poveikio kaita priklausomai nuo kaitinimo režimo.



2.7 pav. Vienpusio atsparumo ugniai bandymo metodo principinė schema:

1 – elektrinė krosnelė; 2 – elektrinės krosnelės valdymo blokas; 3 – bandinio laikiklis su mineralinės vatos izoliacija; 4 – temperatūros registravimo prietaisas; 5 – bandinys; 6 – matavimo termopora K tipo, 7 – elektrinės krosnelės termopora

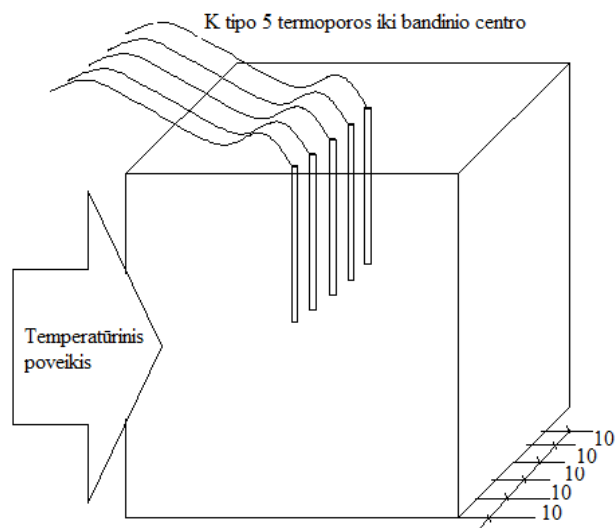
Fig. 2.7. The principal scheme of the one-side heating equipment that has been used for one side heating tests: 1 – electric oven; 2 – electric oven heating control unit; 3 – sample storage device with mineral wool insulating; 4 – temperature recorder; 5 – specimen; 6 – measuring thermocouple K type, 7 – thermocouple of electric oven

Šiluminis režimas buvo reglamentuojamas standartinio gaisro temperatūros, kuri imituoja išsiplėtusio gaisro stadiją (post – flashover), priklausomybe nuo laiko (2.6 pav.). Naudojantis minėtąja priklausomybe, konstrukcijų atsparumo ugniai bandymai atliekami įvairiose pasaulio šalyse.

Skirtinga temperatūros kaitos sparta kaitinimo kameroje svarbi keliais aspektais. Greitai pasiekta aukšta temperatūra imituoja pačias nepalankiausias tiriamajai medžiagai, kai joje prasideda nepertraukiamas šilumos sklidimo procesas, aplinkos sąlygas, darantis įtaką fizikiniams–cheminiams virsmams tiriamojame medžiagoje.

Naudojant minėtą įrangą betono bandiniai buvo kaitinami tam tikrą iš anksto numatytą laiko tarpą t , 180 min. Po šio laiko bandinys buvo ištraukiamas iš kameros ir atvėsinamas aplinkos sąlygose: temperatūra 23 ± 3 °C, santykinė drėgmė 50 ± 10 %.

Temperatūros pasiskirstymui įvairiuose betono sluoksniuose matuoti, buvo pasitelktos penkios K tipo termoporos. Jos įdedamos į betono kubelį, prieš tai išgręžus 3 mm skersmens kiaurymes į 5 cm bandinio gylį. Iš viso gręžiamos 5 kiaurymės 1 cm atstumu viena nuo kitos iš kaitinamos plokštumos. Bandinio su termoporomis vaizdas pateiktas 2.8 paveiksle.



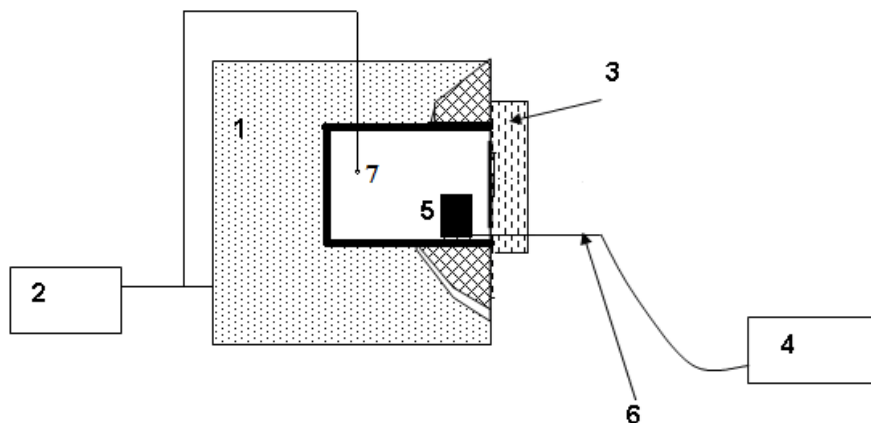
2.8 pav. Vienpusio atsparumo ugniai bandinio su termoporomis vaizdas

Fig. 2.8. One-side heating specimen with thermocouples view

Betono savybių pokyčių vertinimas atliktas pagal 2.5 poskyryje aprašytas metodikas.

2.4. Tūrinis atsparumo ugniai bandymo metodas

Tūrinio atsparumo ugniai bandymo metodui naudoti suformuoti skirtingų mišinių betono kubeliai, kurių matmenys 100 mm × 100 mm × 100 mm. Kubelis buvo padedamas ant kaolino vatos 30 mm storio sluoksnio, taip viena kubelio briauna buvo izoliuota nuo temperatūrinio poveikio, kitos penkios neizoliuotos, t. y. užtikrintas laisvas šilumos pritekėjimas iš visų pusių. Bandymo metodo principinė schema pateikta 2.9 paveiksle.



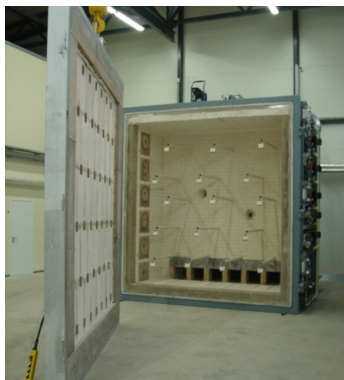
2.9 pav. Tūrinio atsparumo ugniai bandymo metodo principinė schema:

- 1 – kaitinimo krosnis; 2 – kaitinimo krosnies valdymo blokas; 3 – kameros durys;
4 – temperatūros registravimo prietaisas; 5 – bandinys; 6 – matavimo termopora K tipo, 7 – krosnies termopora

Fig. 2.9. The principal scheme of the volumetric heating equipment that has been used for volumetric heating tests: 1 – oven; 2 – oven heating control unit; 3 – door of chamber; 4 – temperature recorder; 5 – specimen, 6 – measuring thermocouple K type, 7 – thermocouple of oven

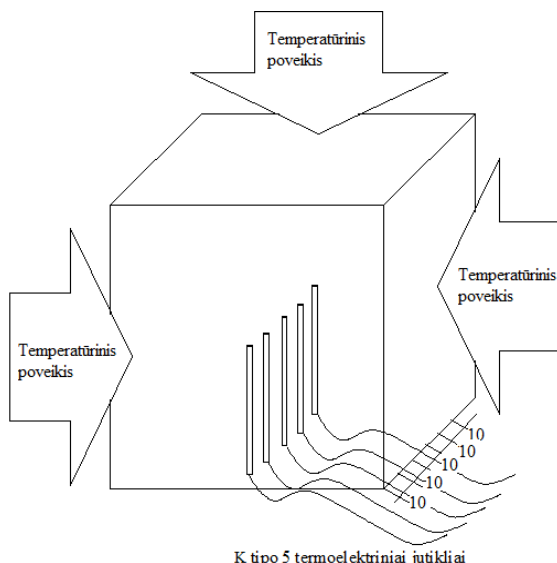
Tūriniai bandymai atliekami su Hasle firmos vertikalia konstrukcija 3,4 m × 3,4 m × 1,5 m (aukštis × plotis × gylis) atsparumo ugniai bandymų krosnimi, kuri atitinka bandymo standarto LST EN 1363-1:2012 keliamus reikalavimus. Bandymų krosnies vaizdas pateikiamas paveiksle 2.10.

Eksperimento principas – kaitinti bandinį iš visų pusių, kaip numatyta standarte LST EN 1363-1:2012 pagal reglamentuotą temperatūros–laiko priklausomybę. Temperatūros priklausomybė pateikta 2.1 formulėje, temperatūros kilimo grafikas 2.6 paveiksle, principinė schema 2.9 paveiksle. Naudojant minėtą įrangą betono bandiniai buvo kaitinami tam tikrą iš anksto numatytą laiką tarpą t , 180 min. Po šio laiko bandinys buvo ištraukiamas iš kameros ir atvėsintas aplinkos sąlygose: temperatūra 23 ± 3 °C, santykinė drėgmė 50 ± 10 %.



2.10 pav. Tūrinio kaitinimo bandymų įrangos bendras vaizdas
Fig. 2.10. The overall view of volumetrical heating testing equipment

Temperatūros pasiskirstymui betono įvairiuose sluoksniuose matuoti, buvo pasitelktos penkios K tipo termoporos. Jos įdedamos į betono kubelį, prieš tai išgręžus 3 mm skersmens kiaurymes į 5 cm bandinio gylį. Iš viso gręžiamos 5 kiaurymės 1 cm atstumu viena nuo kitos pradedant nuo bandinio krašto. Bandinio su termoporomis vaizdas pateiktas 2.11 paveiksle.



2.11 pav. Tūrinio atsparumo ugniai bandinio su termoporomis vaizdas
Fig. 2.11. Volumetrical heating specimen with termocouples view

Betono savybių pokyčių vertinimas atliktas pagal 2.5 poskyryje aprašytas metodikas.

2.5. Cementinio akmens ir betono savybių vertinimas

2.5.1. Cementinio akmens ir užpildų termogravimetrinė ir infraraudonųjų spindulių spektroskopijos analizė

Terminus efektus kaitinamoje medžiagoje sukelia fizikiniai ir cheminiai procesai. Dėl šių efektų dažnai kinta tiriamosios medžiagos masė. Todėl, atliekant termografinę analizę, šiuolaikiniuose prietaisuose kartu registruojami ir masės pokyčiai. Šie duomenys naudojami tiriamųjų medžiagų kiekybinei analizei.

Termogravimetrijos metu registruojama masės kitimo kreivė (vadinamoji gravimetrijos kreivė – TG) ir masės pokyčių $\Delta m/\Delta T$ kreivė (ji gaunama derivatografu ir vadinama derivacine terminės gravimetrijos kreive – DTG) (Šiaučiūnas *et al.* 2007).

Termografinė analizė atlikta naudojant termogravimetrinį analizatorių „TA instrument“. Temperatūra matuota K tipo termopora, naudoti platinos tigliai. Analizė atlikta temperatūrų intervale nuo 25 °C iki 1000 °C. Temperatūros kėlimo greitis 10 °C/min. Pasirinkta inertinė azoto aplinka.

Cementinio akmens paruošimas termogravimetriniams tyrimams:

1. Sumaišomi skirtingi cementai su vandeniu tuo pačiu santykiu ir pagaminamos prizmelės, matmenys (40×40×160) mm.
2. Prizmelės vieną dieną kietinamos laboratorijos aplinkoje ir 28 dienas vandenyje 20 °C temperatūroje, kiti bandiniai po kietinimo vandenyje buvo išlaikomi kondicionavimo patalpoje pusantų metų, patalpos sąlygos: 23±2 °C temperatūra ir 50±5 % santykinė drėgmė.
3. Po kietinimo (28 parų arba 1,5 metų) iš prizmelės vidurio yra paimama cementinio akmens dalis, kuri sutrupinama ir sijojama, naudojant 0,8 mm akučių dydžio sieta.
4. Gavus hidratuoto cemento miltelius yra sustabdoma cementinio akmens hidratacija, panaudojant acetoną.

Užpildo termogravimetriniai tyrimai atliekami su skirtingais užpildais juos sutrupinus ir prasijojus per 0,8 mm akučių dydžio sieta.

Cementinio akmens infraraudonųjų spindulių spektroskopiniai tyrimai atlikti su Mattson firmos infraraudonųjų spindulių spektrometru. Bandymai atliekami su skirtingais cementais, kurių hidratacija truko 28 paras ir 1,5 metų. Cemento milteliai paruošti pagal tą pačią technologiją kaip aprašyta 2.5.1 skyrelyje „cementinio akmens paruošimas termogravimetrijos tyrimams“ papildomai panaudojant kalio bromidą, kuris IR spindulių diapazone yra skaidrus (Šiaučiūnas *et al.* 2007).

Bandinių paruošimas infraraudonųjų spindulių spektroskopijos tyrimams:

1. 2 mg tiriamos medžiagos sumaišoma su 200 mg kalio bromidu (KBr).

2. Mišinys suspaudžiamas presu ir gaunamas kelių šimtųjų milimetro bandinys, kitaip vadinamas peletė.

2.5.2. Betono savybių pokyčiai po kaitinimo

Betono masės nuostoliai M apskaičiuojami po 3 val. kaitinimo temperatūriniu režimu pagal standartinę gaisro kreivę. Prieš kaitinant betono bandinys (100 mm x 100 mm x 100 mm) yra pasveriamas ir nustatoma pradinė masė M_0 . Po 3 val. kaitinimo bandinys ataušinamas aplinkos temperatūroje ir vėl pasveriamas, nustatoma M_1 . Masės nuostoliai apskaičiuojami pagal formulę:

$$M = ((M_0 - M_1) / M_0) \cdot 100 \%, \quad (2.2)$$

čia M – masės nuostoliai, %; M_0 – pradinė bandinio masė, g; M_1 – po 3 val. kaitinimo bandinio masė, g

Ultragarso sklaidimo greitis nustatomas betono bandinio po 28 parų kietinimo ir po 3 valandų kaitinimo vienpusiu atsparumo vertinimo metodu temperatūriniu režimu pagal standartinę gaisro kreivę. Ultragarso impulso sklaidimo laikas nustatytas prietaisu „Pundit 7“ (keitiklių dažnis 54 kHz), apskaičiuotas ultragarso sklaidimo greitis (V_{UG} , m/s) pagal formulę (Elzbutas 2007):

$$V_{\text{UG}} = l/t, \quad (2.3)$$

čia l – bandinio ilgis, m; t – signalo sklaidimo laikas, s

Betono gniuždymo stipris nustatomas po 28 parų kietinimo, kiekvienam sumaišytam betono mišiniui. Po temperatūrinio poveikio betono kubeliai gniuždomi praėjus ne daugiau kaip 24 valandoms. Gniuždymo stipris nustatomas hidrauliniu Alpha3–3000 S presu, gamintojas Form Test Seidner & Co. GmbH, apkrovos kėlimo greitis 0,6 MPa/s.

2.5.3. Betono dilatometrinė ir mikrostruktūros analizė

Betono terminis išsiplėtimas nustatomas naudojant dilatometrą „Linseis L76“, kaitinimo greitis 10 °C/min. Analizė atlikta temperatūrų intervale nuo 25 °C iki 1000 °C. Bandinių dydis 8 mm x 8 mm x 50 mm, išpjauti iš 100 mm x 100 mm x 100 mm dydžio betono kubelio.

Sukietėjusio betono su skirtingais oro kiekiais mikrostruktūra buvo tiriama naudojant SEM JEOL JSM–7600F skenuojančią elektroninę mikroskopiją (SEM). Elektroninės mikroskopijos parametrai: 10 kV ir 20 kV įtampa, atstumas iki bandinio paviršiaus nuo 7 iki 10 mm. Tyrimai atliekami iš atskelto be-

tono bandinio. Tyrimui paimami bandiniai iš kaitintos betono pusės, iš bandinio centro ir iš neveiktos pusės. Skeltas betono paviršius buvo padengtas plonu aukso sluoksniu, vakuume garinant aukso elektrodą naudojant „QUORUM Q150R ES“ prietaisą. Vaizdas kuriamas registruojant antrinių elektronų signalą. Atliktas didinimas nuo 30 iki 15000 kartų.

2.6. Tyrimų rezultatų statistinio apdorojimo metodika

Regresinei analizei atlikti duomenys buvo grupuojami ir paruošiami programa „MS Excel“, o eksperimentiniams duomenims statistškai apdoroti buvo naudojama kompiuterinė programa „STATISTICA 7“ (Sakalauskas 1998). Šia programa atlikta eksperimentinių duomenų regresinė analizė bei gautos regresinės kreivės patikimumo statistinė analizė. Regresinė analizė nustato statistinio ryšio pobūdį ir aprašo priklausomojo kintamojo vidutinių reikšmių priklausomybę nuo vieno ar kelių nepriklausomųjų kintamųjų reikšmių matematine formule ir kartu padeda prognozuoti funkcijos reikšmes.

Buvo tikrinami įvairūs matematiniai modeliai: tiesinis ($y = b_0 + b \cdot x$), su lūžio tašku ($y = (b_{01} + b_{11} \cdot x_1 + \dots + b_{m1} \cdot x_m) \cdot (y \leq b_n) + (b_{02} + b_{12} \cdot x_1 + \dots + b_{m2} \cdot x_m) \cdot (y > b_n)$). Priklausomybei išreikšti buvo pasirenkama tokia funkcija, kuri tiksliausiai apibūdina duomenų pasiskirstymo pobūdį. Buvo apskaičiuoti regresinio modelio kokybės rodikliai: koreliacijos koeficientas R ir determinacijos koeficientas R^2 . Šie koeficientai pageidautini kuo artimesni vienetui (Čekanavičius, Murauskas 2004; Martinėnas 2004). Jeigu R koeficiento reikšmė yra tarp 0,90 ir 1, tai tarp tiriamųjų dydžių yra labai stiprus tarpusavio ryšys, kai $0,7 < R < 0,89$, stiprus ryšys. Kai dydis yra tarp 0,69 ir 0,4, jis yra vidutinio stiprumo, o kai mažiau nei 0,4, priklausomybė tarp dydžių silpna (Čekanavičius, Murauskas 2004; Martinėnas 2004). Vidutinis standartinis nuokrypis S_e išreiškiamas kvadratine šaknimi iš normuotos klaidų nuokrypio kvadratų sumos. Kuo apskaičiuotieji S_e dydžiai mažesni, tuo mažesnis nuokrypis nuo regresinės kreivės (Čekanavičius, Murauskas 2004; Martinėnas 2004).

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Infraraudonųjų spindulių spektroskopinė ir termogravimetrinė analizė leidžia ištirti cementinio akmens mineralinės sudėties pokyčius veikiant aukštai temperatūrai ir kiekybiškai įvertinti destruktinius procesus vykstančius betone gaisro metu.

2. Dilatometrinė analizė kiekybiškai parodo betono komponentų (užpildų, mineralinių priedų) kristalinės gardelės pokyčius aukštose temperatūrose ir destruktinius procesus vykstančius betone.
3. Vienpusis ir tūrinis atsparumo ugniai bandymų metodai leidžia nustatyti temperatūrinių laukų bandinyje pasiskirstymą, kuriais remiantis galima tiksliai prognozuoti konstrukcijos skerspjūvio temperatūrą bet kuriame taške ir nustatyti betono atsparumą ugniai.
4. Aukštos temperatūros paveikto betono analizė naudojant elektroninę mikroskopiją leidžia užfiksuoti pakitusius cementinio akmens hidratacijos produktus pagal jų morfologiją.

Cemento tipo, užpildų bei oro kiekio įtaka betono irimo procesams veikiant aukštai temperatūrai

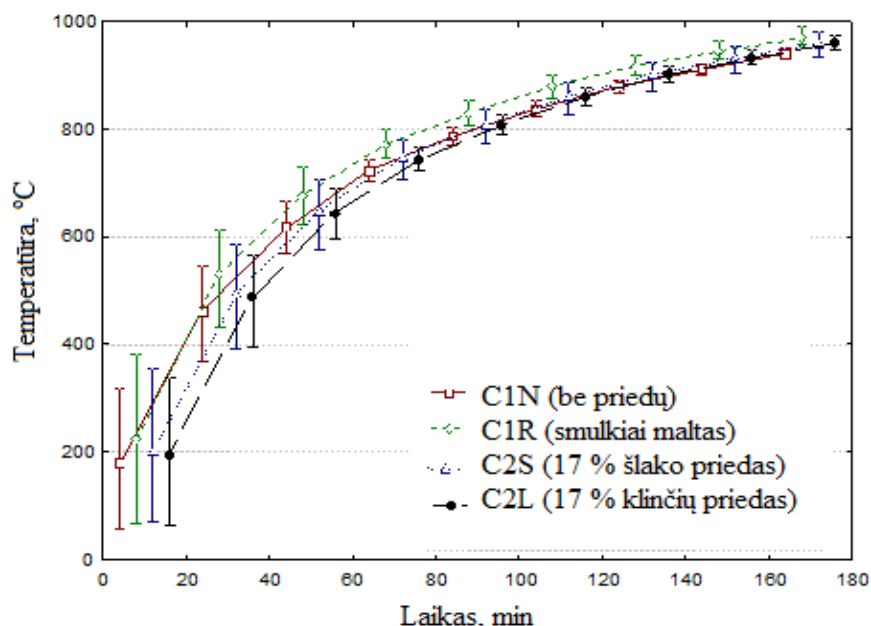
Skyriuje pateikiami rezultatai, gauti atlikus temperatūros pasiskirstymo betono bandiniuose su skirtingais cementais, užpildais bei skirtingu įtraukto oro kiekiu bandymus. Nagrinėjami masės nuostolių, ultragarso greičio sklidimo, deformaciniai, infraraudonųjų spindulių spektroskopiniai bei gniuždymo stiprio pokyčiai kaitinant betoną ar cementinį akmenį iki 1000–1100 °C temperatūros. Taip pat pateikiami temperatūrinio režimo prognozavimo betone rezultatai gaisro metu.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta trijuose straipsniuose (Jocius *et al.* 2013; Jocius *et al.* 2014; Jocius, Skripkiūnas 2016) ir pristatyta penkiose mokslinėse konferencijose.

3.1. Mineralinių priedų įtaka betono atsparumui ugniai

3.1.1. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais cementais esant vienpusiam temperatūros poveikiui

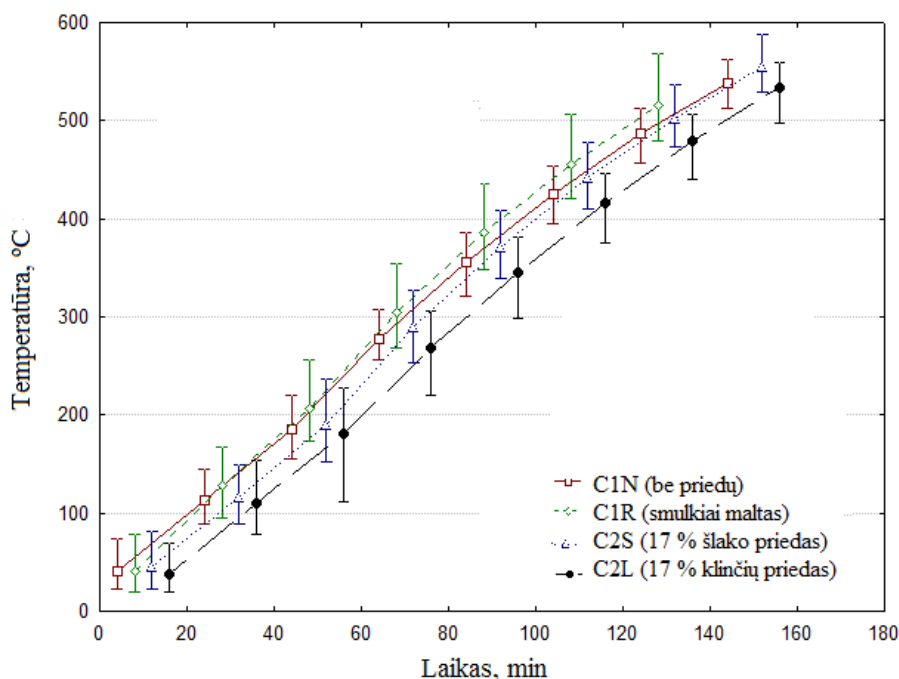
Norint ištirti cemento priedų įtaką betono atsparumui ugniai, buvo atlikti temperatūros pasiskirstymo bandiniuose bandymai, naudojant vienpusę kaitinimo metodiką, pagal standartinę gaisro kreivę. Bandinys buvo kaitinamas 3 valandas. Tyrimams buvo parinkti penki skirtingi cementai: CEM I 42,5N (be priedų), CEM I 42,5R (be priedų, smulkiai maltas), CEM II/A-LL 42,5N (su 17 % klinties priedu), CEM II/A-S 42,5 N (su 17 % aukštakrosnių šlako priedu) ir CEM III/B 32,5 N-LH/SR (su 70 % aukštakrosnių šlako priedu). Bandiniams formuoti, buvo pasirinktas inertinis užpildas šamotas frakcija 0/4. Betono sudėtys pateiktos 2.8 lentelėje. Su skirtingais cementais gautos betono perkaitimo kreivės pateikiamos 3.1–3.3 paveiksluose.



3.1 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose C1N, C1R, C2S, C2L su skirtingais cementais 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiu būdu

Fig. 3.1. The temperature distribution of the concrete samples C1N, C1R, C2S, C2L with different cement from 1 cm distance from the heated surface of the one side heating

Bandiniuose su skirtingais cementais 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus, temperatūra kyla tolygiai pagal logaritminę kreivę, pateiktą 2.9 paveiksle. Kreivės forma panaši į standartinio gaisro kreivę. Pradžioje iki 20 minučių betono temperatūra žymiai skiriasi nuo aplinkos temperatūros pagal standartinę gaisro kreivę, o po 3 valandų aplinkos ir bandinio temperatūros beveik susilygina. Bandymo pradžioje fiksuojama didesnė duomenų sklaida, bandymo pabaigoje duomenų sklaida sumažėja. Aukščiausia temperatūra po trijų valandų kaitinimo, kuri siekia 977 °C gauta su smulkiai maltu cementu (C1R). Kitų cementų temperatūros pasiskirto intervale 947–967 °C. Mažiausia temperatūra (947 °C) užfiksuota betono bandinyje su cementu, kuriame nėra priedų (C1N).



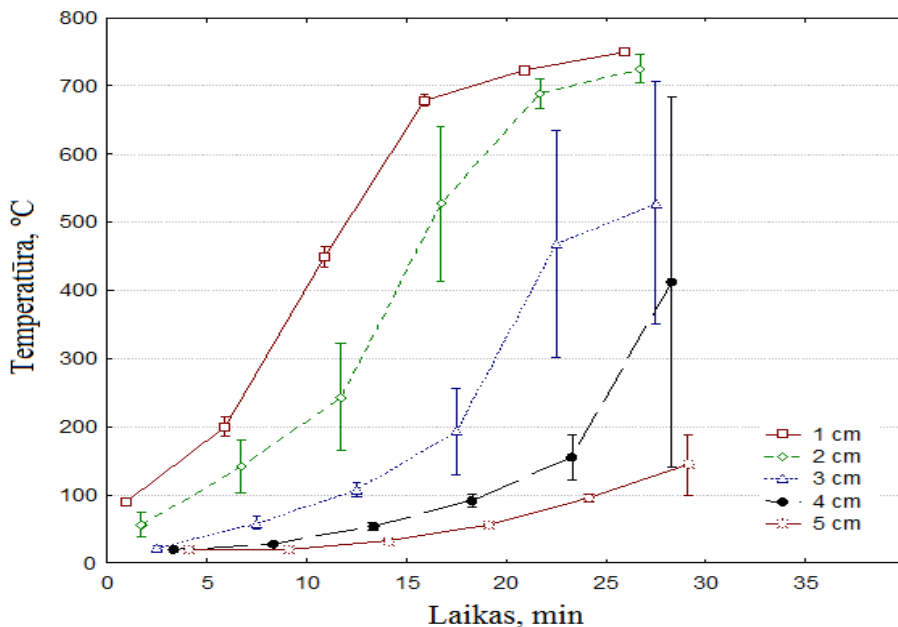
3.2 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose C1N, C1R, C2S, C2L su skirtingais cementais 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiu būdu

Fig. 3.2. The temperature distribution of the concrete samples C1N, C1R, C2S, C2L with different cement from 5 cm distance from the heated surface of the one side heating

Bandiniuose su skirtingais cementais nustatant temperatūros pasiskirstymą 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus matomas beveik tiesinis temperatūros pokytis laiko bėgyje. Duomenų sklaida tiek bandymo pradžioje, tiek pabaigoje yra vienoda. Aukščiausios temperatūros fiksuojamos betono bandiniuose su smulkiai maltu cementu (C1R), po trijų valandų siekia 613 °C, kituose cemen-

tuose registruojami tokie rezultatai: cimente turinčiame 17 % šlako priedo (C2S) pasiekta 608 °C temperatūra, su cementu neturinčiu mineralinių priedų ir cementu turinčiu 17 % klinties priedo pasiekta 589 °C temperatūra.

Bandiniuose po 3 valandų kaitinimo su daug aukštakrosnių šlako turinčiu cementu (70 %), temperatūros pasiskirstymo nepavyko užfiksuoti, nes įvyko bandinio sprogstamoji irtis. Temperatūros pasiskirstymo kreivės įvairiuose bandinio sluoksniuose iki trisdešimties minučių pateikiamos 3.3 paveiksle.



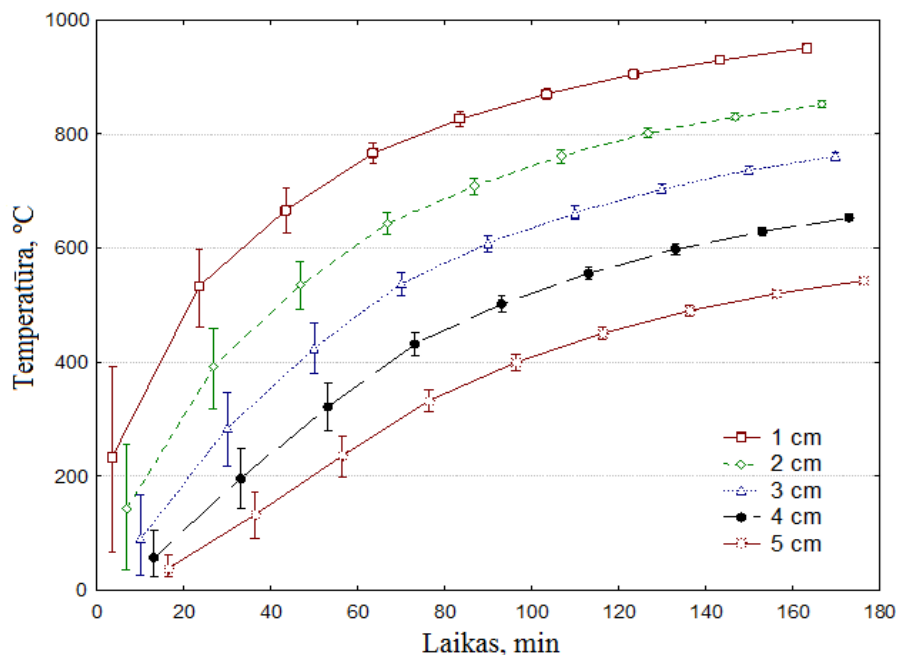
3.3 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose (C3) su CEM III/B 32,5 N-LH/SR (su 70 % aukštakrosnių šlako priedu) kaitinant vienpusiu būdu

Fig. 3.3. Temperature distribution in concrete samples (C3) with CEM III / B32,5 N-LH / SR (with 70% blast furnace slag) of the one side heating

Bandiniuose su cementu turinčiame apie 70 % aukštakrosnių šlako vyksta sprogstamoji irtis, dėl to duomenų sklaida yra didelė. 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus po 30 minučių yra pasiekama 750 °C temperatūra, 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus yra pasiekama 145 °C temperatūra. Iš 3.3 paveikslą galime matyti, kad vykstant intensyviai bandinio paviršiaus irimui, susidaro didelis temperatūrų skirtumas tarp paviršinio sluoksnio ir bandinio centro.

Siekiant išvengti betono bandinio sprogstamosios irties, buvo atlikti išdžiovinimo 160 °C temperatūroje bandinio su šiuo cementu bandymai. Išdžiovin-

to bandinio temperatūrinės kreivės skirtinguose sluoksniuose pateikiamos 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandinyje išlaikytame 160 °C temperatūroje (C3) su CEM III/B 32,5 N-LH/SR cementu (su 70 % aukštakrosnių šlako priedu) kaitinant vienpusiu būdu

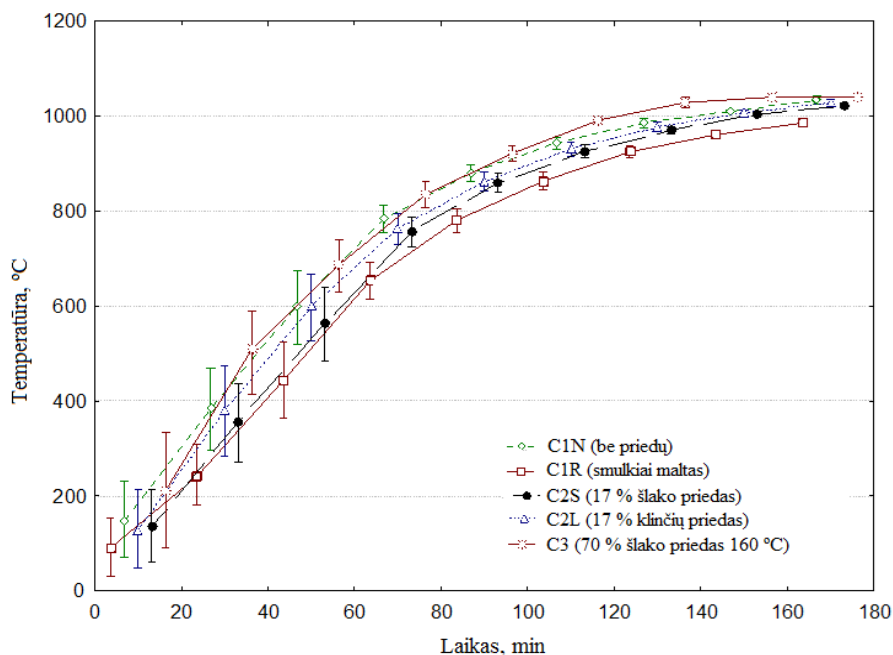
Fig. 3.4. Temperature distribution in the concrete sample passed at 160 °C (C3) with the CEM III / B 32,5 N-LH / SR cement (containing 70% of blast furnace slag) of the one side heating

Išdžioviname bandinyje su dideliu kiekiu šlako, temperatūrų kilimas išoriniame ir centriniame sluoksniuose, buvo panašus kaip ir bandiniuose su kitais cementais tolygiai pagal logaritminę kreivę. Išdžiovinus bandinius su cementu turinčiu didelį kiekį šlako, užfiksuotas 3,8 % masės praradimas. Atlikus kaitinimą pagal standartinę vienpusio atsparumo ugniai bandymo metodiką, bandinio sprogstamoji iirtis nebuvo užfiksuota.

Remiantis temperatūrų pasiskirstymu bandinyje rezultatais, galima teigti, kad gaisro atveju yra pavojingiausias betonas, kuriame panaudotas cementas su dideliu šlako (apie 70 %) kiekiu t. y. CEM III tipo cementas.

3.1.2. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais cementais esant tūriniam temperatūros poveikiui

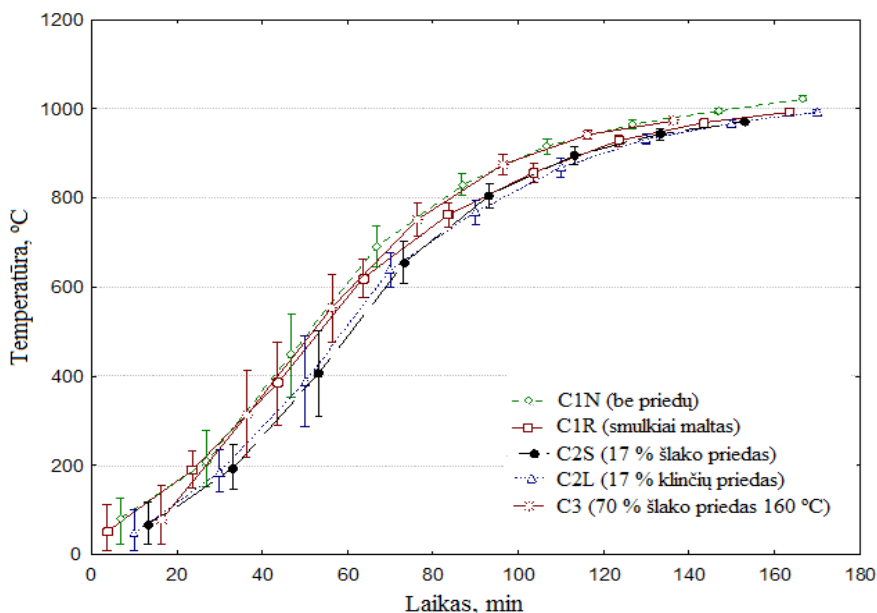
Vykstant gaisrui, betoninės arba gelžbetoninės konstrukcijos gali būti veikiamos iš visų pusių, todėl buvo atliekami tyrimai, pasirenkant tūrinio atsparumo ugniai vertinimo metodiką. Temperatūros pasiskirstymo grafikai, betono bandinių su skirtingais cementais pateikiami 3.5–3.6 paveiksluose.



3.5 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose C1N, C1R, C2S, C2L, C3 su skirtingais cementais 1 cm atstume kaitinant tūriniu būdu

Fig. 3.5. The temperature distribution of the concrete samples C1N, C1R, C2S, C2L, C3 with different cements 1 cm distance of volumetric heating

Bandiniuose su skirtingais cementais, 1 cm atstumu temperatūra kinta beveik tiesiškai iki 900 °C temperatūros, vėliau temperatūros kilimas sulėtėja. Mažiausia temperatūra 991 °C po trijų valandų kaitinimo pasiekta betono bandiniuose, kurie suformuoti su smulkiai maltu cementu, neturinčiu mineralinių priedų. Bandiniuose su kitais cementais užfiksuotos temperatūros yra panašios: cemento be priedų – 1043 °C, cemento su 17 % klinties priedu – 1034 °C, cemento su 17 % šlako priedu – 1028 °C, cemento su 70 % šlako priedu ir išdžiovinto 160 °C temperatūroje – 1039 °C.



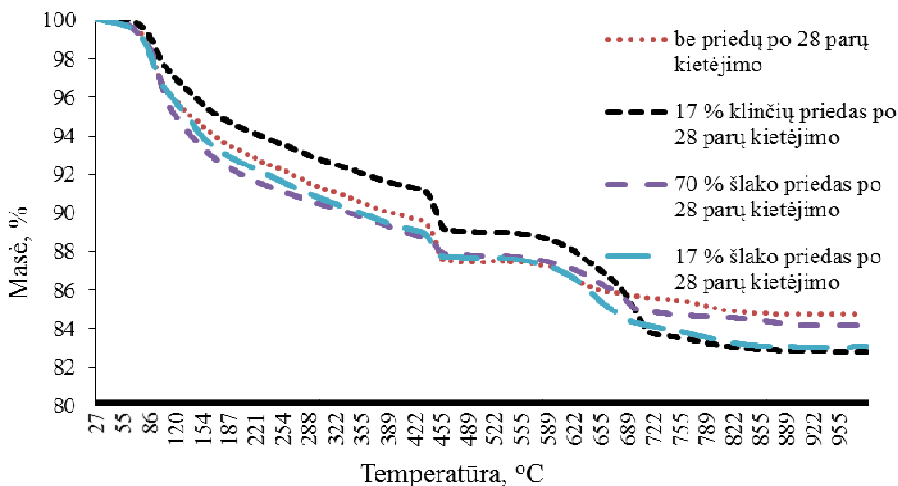
3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais cementais 5 cm atstume kaitinant tūriniu būdu

Fig. 3.6. The temperature distribution of the concrete samples with different cements 5 cm distance of volumetric heating

Betono bandiniuose su skirtingais cementais 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus po 3 valandų kaitinimo pasiektos tokios temperatūros: betono su smulkiai maltu be priedų cementu – 997 °C, su cementu be priedų – 1030 °C, su cementu su klinties priedu – 998 °C, su cementu su 17 % šlako priedu – 972 °C, su cementu su 70 % šlako priedu ir išdžiovinoto 160 °C temperatūroje – 976 °C. Iš 3.5 ir 3.6 paveiksluose pateiktų kreivių pastebėta, kad matuojant temperatūrų pasiskirstymą betono bandiniuose 1 ir 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus nustatyti maži temperatūros skirtumai. Esant tūriniam bandymui šilumos perdavimas vyksta ne iš vienos pusės į bandinio centrą o iš penkių skirtingų bandinio kraštinių, šiuo atveju gaunamas sudėtingas šilumos perdavimo procesas į bandinio centrą, kuris apsunkina bandymų rezultatų analizę. Remiantis atliktais vienvpusio ir tūrinio kaitinimo bandymais nustatyta, kad šilumos perdavimo procesus betone geriau atspindi atlikti vienvpusio kaitinimo tyrimų rezultatai.

3.1.3. Mineralinio priedo įtaka cementinio akmens destrukciniams procesams

Siekiant išsiaiškinti skirtingų tipų cemento įtaką betono atsparumui ugniai, buvo atlikti termogravimetriniai tyrimai (TG, DTG) su cementiniu akmeniu. Tyrimui pasirinkti keturi skirtingi cementai: CEM I 42,5N (be priedų), CEM II/A-LL 42,5N (su 17 % klinties priedu), CEM II/A-S 42,5N N (su 17 % aukštakrosnių šlako priedu) ir CEM III/B 32,5N-LH/SR (su 70 % aukštakrosnių šlako priedu). 3.7 paveiksle pateikta masės nuostolių veikiant temperatūrai kreivės (TG).



3.7 pav. Cementinio akmens su skirtingais mineraliniais priedais termogravimetrinės analizės kreivės po 28 parų kietėjimo

Fig. 3.7. Termogravimetric analysis curve of 28 days hardening of cement paste with different cement mineral additives

Remiantis termogravimetrinių tyrimų rezultatais (TG kreivėmis) galima įvardinti cementinio akmens su skirtingais cemento mineraliniais priedais skirtumus:

100–130 °C temperatūroje gauti masės nuostoliai charakterizuoja laisvo ir fiziškai surišto vandens kiekį cementiniame akmenyje. 100–130 °C temperatūroje didžiausi masės nuostoliai (4,3 %) užfiksuoti su CEM III/B32,5 N-LH/SR tipo cementu, kurio sudėtyje yra apie 70 % aukštakrosnių šlako, mažiausi masės nuostoliai (2,6 %) užfiksuoti su CEM II A-LL 42,5N, kuriame yra 17 % klinties priedo, su CEM I 42,5N užfiksuota 3,4 %, su CEM II A-S 42,5N užfiksuota 3,8 % masės nuostoliai. Šie masės nuostoliai paaiškinami laisvo ir adsorbuoto vandens pašalinimu iš gelio pavidalo kalcio hidrosilikatų ir etringito.

140–170 °C temperatūroje didžiausi masės nuostoliai užfiksuoti (7,3 %) su CEM III/B32,5 N-LH/SR tipo cementu, mažiausi masės nuostoliai (5,0 %)

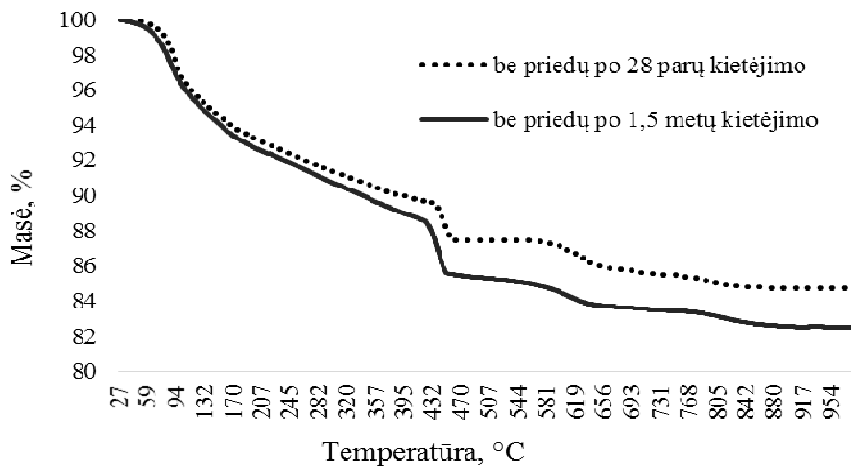
užfiksuoti su CEM II A-LL 42,5N, su CEM I 42,5N užfiksuota 6,0 %, su CEM II A-S 42,5N užfiksuota 6,8 %. Šie masės nuostoliai paaiškinami heksagonalinio hidroaluminato suirimu.

430–470 °C temperatūroje didžiausi masės nuostoliai užfiksuoti (12,5 %) su CEM I 42,5N tipo cementu, mažiausi masės nuostoliai (10,9 %) užfiksuoti su CEM II A-LL 42,5N, su CEM III/B32,5 N-LH/SR užfiksuota (12,2 %), su CEM II A-S 42,5N užfiksuota (12,3 %). Masės nuostolius galima aiškinti kalcio hidrosilikatų dehidratacija. Cemente be mineralinių priedų yra didžiausias kalcio hidrosilikatų kiekis.

670–730 °C temperatūros didžiausi masės nuostoliai užfiksuoti (16,6 %) su CEM II A-LL 42,5N tipo cementu, mažiausi masės nuostoliai (14,6 %) užfiksuoti su CEM I 42,5N, su CEM III/B32,5 N-LH/SR užfiksuota (15,3 %), su CEM II A-S 42,5N užfiksuota (16,2 %). Šis masės nuostolis paaiškinamas kalcio ir magnio karbonatų skilimu.

Bandymai atliekami iki 1000 °C, gauti bendri masės nuostoliai: CEM I 42,5N – 15,2 %, CEM II A-LL 42,5N – 17,2 %, CEM III/B32,5 N-LH/SR – 15,8 %, CEM II A-S 42,5N – 16,9 %.

Siekiant įvertinti betono hidrataciją po ilgesnio laiko tarpo buvo atlikti papildomi termogravimetriniai tyrimai su skirtingais cementais po pusantrų metų hidratacijos laikotarpio. Masės nuostolių TG kreivės pateiktos 3.8–3.9 paveiksluose.

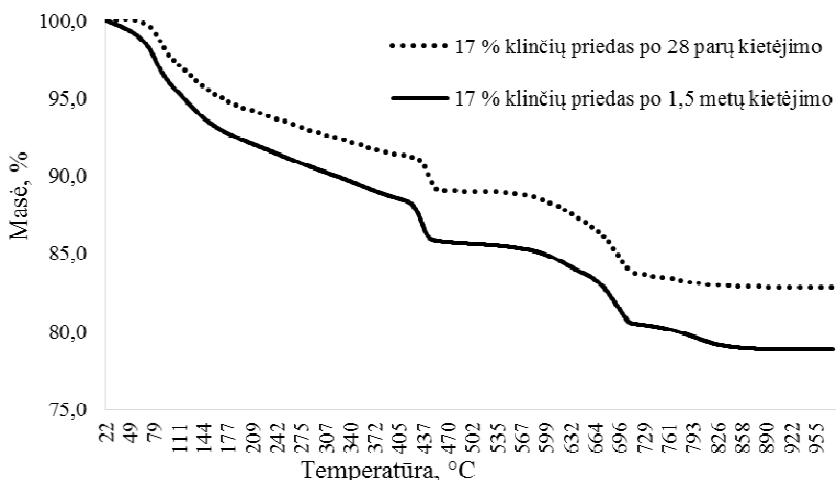


3.8 pav. Cementinio akmens be priedų po 28 parų ir 1,5 metų kietėjimo termogravimetrinės kreivės

Fig. 3.8. Thermogravimetric analysis curves of hardening cement paste without additives after 28 days and 1.5 years

100–130 °C temperatūroje cementiniame akmenyje po 28 parų ir 1,5 metų gauti tokie rezultatai: po 28 parų gautas masės nuostolis – 3,4 %, kietinant 1,5 metų – 3,8 %.

140–170 °C temperatūroje 28 paras kietintas cementas praranda 6,1 %, po 1,5 metų masės nuostoliai užfiksuoti 6,5 %, didesni masės nuostoliai užfiksuoti prie 430–470 °C temperatūros: po 28 parų masės nuostoliai siekia 12,5 %, po 1,5 metų – 14,6 %. Tai rodo, kad per minėtą laikotarpį vyko intensyvi cemento hidratacija ir buvo gautas žymus kalcio hidrosilikatų kiekio padidėjimas. 670–730 °C temperatūroje po 28 parų masės nuostoliai užfiksuoti 14,6 %, po 1,5 metų kietinimo – 16,6 %. Nuo 28 parų iki 1,5 metų kietinant cementinį akmenį užfiksuotas apie 2 % bendrų masės nuostolių skirtumas, kuris mažai padidėja nuo 470 °C temperatūros. Tai reiškia, kad po ilgo hidratacijos laiko susidaro didesni kiekiai kalcio hidrosilikatų.

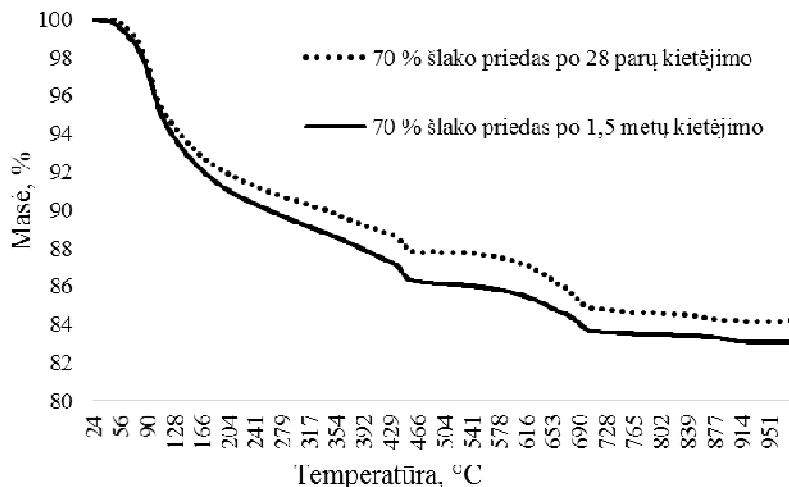


3.9 pav. Cementinio akmens su 17 % klinties priedų po 28 parų ir 1,5 metų kietėjimo termogravimetrinės kreivės

Fig. 3.9. Termogravimetric analysis curves of hardening cement paste with 17% limestone additives after 28 days and 1.5 years

Cemente, kuriame yra klinties priedo, 100–130 °C temperatūroje gauti tokie rezultatai: po 28 parų kietinimo masės nuostoliai užfiksuoti 2,6 %, po 1,5 metų – 4,3 %, 140–170 °C temperatūroje po 28 parų hidratacijos prarandama 5,0 %, po 1,5 metų kietinimo – 7,2 %, 430–470 °C temperatūroje po 28 parų kietinimo užfiksuoti masės nuostoliai siekia 10,9 %, po 1,5 metų – 14,3 %, 670–730 °C temperatūroje po 28 parų kietinimo prarandama 16,5 %, po 1,5

metų – 19,8 %. Bendri masės nuostoliai po 1,5 metų yra 5 % didesni, todėl galima teigti, kad po ilgos eksploatacijos trukmės tokio betono su tokiu cementu atsparumas ugniai mažėja. Įvertinus skaitinius duomenis, galima teigti, kad didesni masės nuostoliai po 1,5 metų kietėjimo fiksuojami pirmame etape, kai šalinasi laisvasis vanduo, trečiame etape, kai vyksta kalcio hidrosilikatų dehidratacija ir ketvirtame etape, kai vyksta karbonatų skilimas.

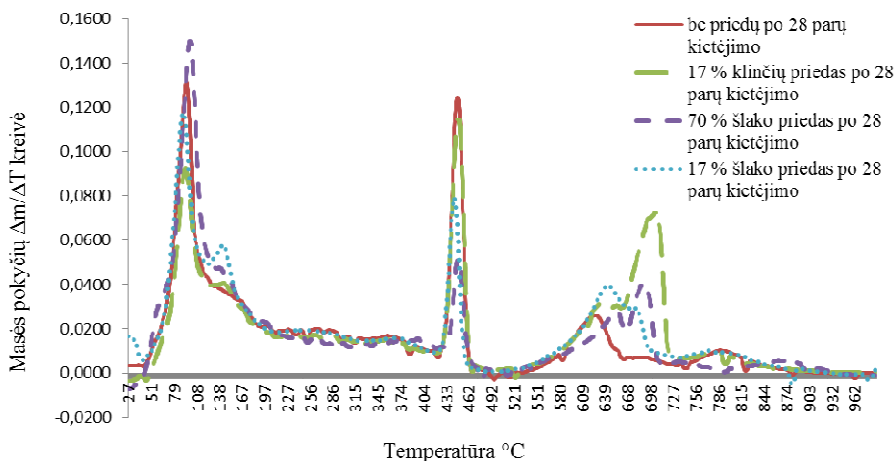


3.10 pav. Cementinio akmens su 70 % šlako priedų po 28 parų ir 1,5 metų kietėjimo termogravimetrinės kreivės

Fig. 3.10. Termogravimetric analysis curve of hardening cement paste with 70% slag additives after 28 days and 1.5 years

Iš kreivių pastebima, kad cemente, kuriame yra didelis kiekis aukštakrosnių šlako (70 %), skirtumai yra mažesni lyginant cementą, turintį klinties priedo. 100–130 °C temperatūroje gauti tokie rezultatai: po 28 parų kietinimo masės nuostolis užfiksuotas 4,2 %, po 1,5 metų – 4,5 %, 140–170 °C temperatūroje po 28 parų hidratacijos prarandama 7,3 %, po 1,5 metų kietinimo – 8,0 %, 430–470 °C temperatūroje po 28 parų kietinimo užfiksuotas masės nuostolis siekia 12,2 %, po 1,5 metų – 13,7 %, 670–730 °C temperatūroje po 28 parų kietinimo prarandama 15,3 %, po 1,5 metų – 16,5 %. Įvertinus skaitinius duomenis, galima teigti, kad didžiausias masės nuostolių padidėjimas užfiksuotas trečiajame etape, kai vyksta kalcio hidrosilikatų dehidratacija. Nežymus bendrų masės nuostolių padidėjimas cementiniame akmenyje su šlako priedu apie 1 % rodo didesnę atsparumą ugniai.

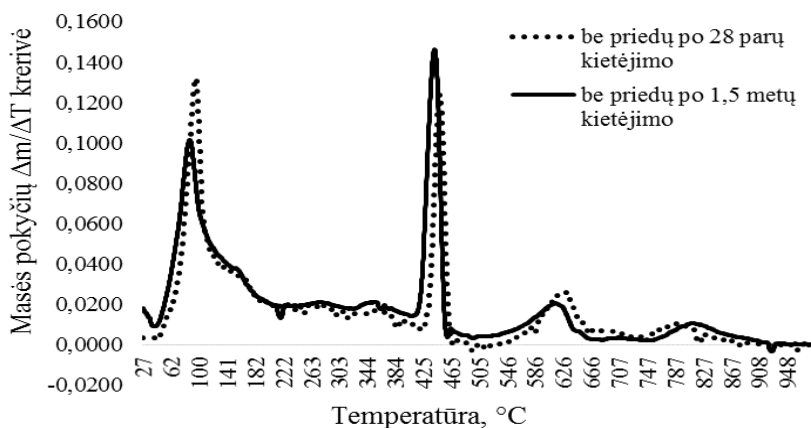
Masės pokyčių greitis (DTG kreivės) po 28 parų kietinimo ir 1,5 metų pateiktas 3.11–3.14 paveiksluose.



3.11 pav. Cementinio akmens su skirtingais mineraliniais priedais diferencinės termogravimetrijos kreivės

Fig. 3.11. Differential thermogravimetric curves of hardening cement paste with different cement mineral additives

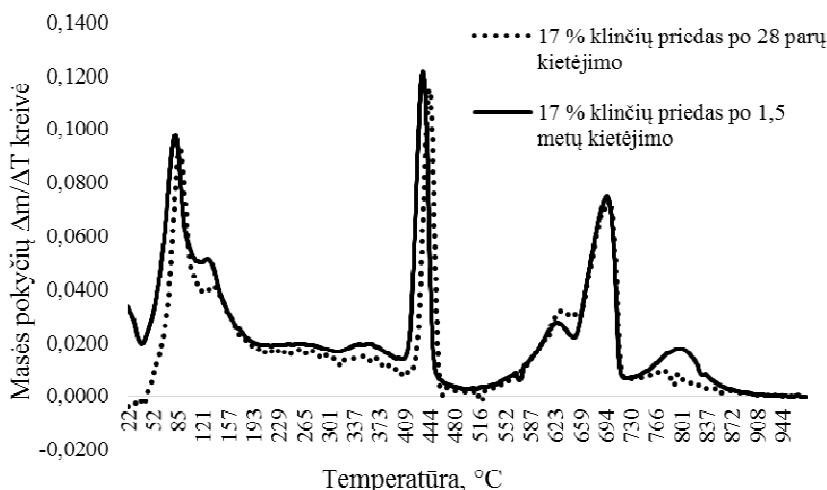
DTG kreivė su skirtingais mineraliniais priedais rodo masės pokyčių greitį priklausomai nuo temperatūros. Didžiausias greitis pirmame etape (smaile 105 °C) pasiekiamas su cementu, kuriame yra 70 % aukštakrosnių šlako, mažiausias masės pokyčio greitis užfiksuotas su cementu turinčiu 17 % klinties priedo. Su šlako priedo turinčiais cementais užfiksuota papildoma smaile prie 140 °C temperatūros charakterizuojanti hidroaluminatų skilimą, kurie susidaro hidratuojant aluminatams esantiems šlake, irstant hidroaluminatui didžiausias masės nuostolių greitis pasiektas su cementu, kuriame yra 17 % šlako priedo, mažiausias cemente be priedų. Trečiame etape (smaile 450 °C) prarandant chemiškai surištą vandenį iš kalcio hidrosilikatų, didžiausias masės pokyčių greitis fiksuojamas su cementu, kuriame nėra priedų, mažiausias greitis fiksuojamas su daug šlako turinčiu cementu. Tai rodo, kad didžiausias kalcio hidrosilikatų kiekis susidaro cemente be priedų, mažesnis – cemente su šlako priedu. Kuo didesnis šlako kiekis cemente, tuo mažesnis kalcio hidrosilikatų kiekis dėl lėtesnės tokio cemento hidratacijos. Ketvirtame etape (smaile 640 °C) skylant kalcio hidroksidui ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) užfiksuotas cemente be priedų. Penktame etape (smaile 700 °C) skylant kalcio ir magnio karbonatams didžiausi pokyčiai užfiksuoti su cementu turinčių klinčių priedą, mažiausi pokyčiai fiksuoti su cementu neturinčių priedų. Siekiant įvertinti ilgą cemento hidratacijos procesą, buvo atlikti tyrimai su skirtingais cemento mineraliniais priedais po 1,5 metų hidratacijos. Masės pokyčių greičio kreivės po 28 parų kietėjimo ir 1,5 metų kietėjimo pateiktos 3.12–3.14 paveiksluose.



3.12 pav. Cementinio akmens be priedų po 28 parų ir 1,5 metų kietėjimo diferencinės termogravimetrijos kreivės

Fig. 3.12. Differential thermogravimetric curves of hardening cement paste without additives after 28 days and 1.5 years

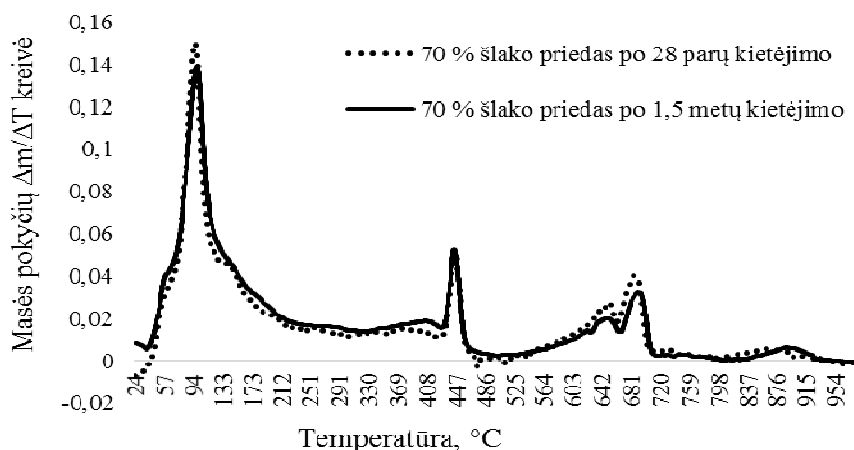
Iš 3.12 paveiksle pateiktų kreivių matosi, kad didžiausi skirtumai užfiksuoti pirmame ir trečiame etape, kurie parodo, kad po ilgesnio hidratacijos laikotarpio laisvojo vandens sumažėja, bet padidėja kalcio hidrosilikatų, kituose etapuose duomenys panašūs.



3.13 pav. Cementinio akmens su 17 % klinčių priedu po 28 parų ir 1,5 metų kietėjimo diferencinės termogravimetrijos kreivės

Fig. 3.13. Differential thermogravimetric curves of hardening cement paste with 17% limestone additives after 28 days and 1.5 years

Iš 3.13 paveiksle pateiktų kreivių užfiksuotas nežymus padidėjimas pirmame ir trečiame etape, kurie parodo laisvojo vandens ir kalcio hidrosilikatų nežymų padidėjimą po ilgo hidratacijos laikotarpio, kituose etapuose duomenys panašūs.

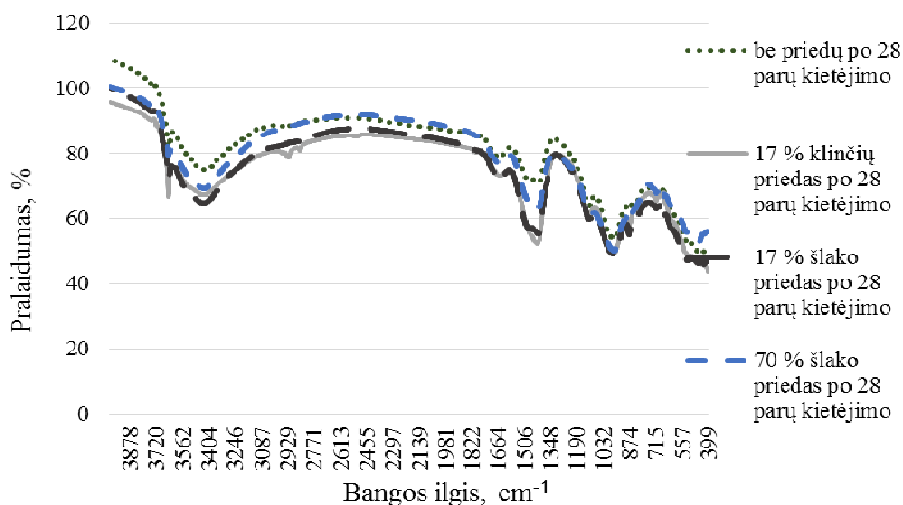


3.14 pav. Cementinio akmens su 70 % šlako priedu po 28 parų ir 1,5 metų kietėjimo diferencinės termogravimetrijos kreivės

Fig. 3.14. Differential thermogravimetric curves of hardening cement paste with 70% slag additives after 28 days and 1.5 years

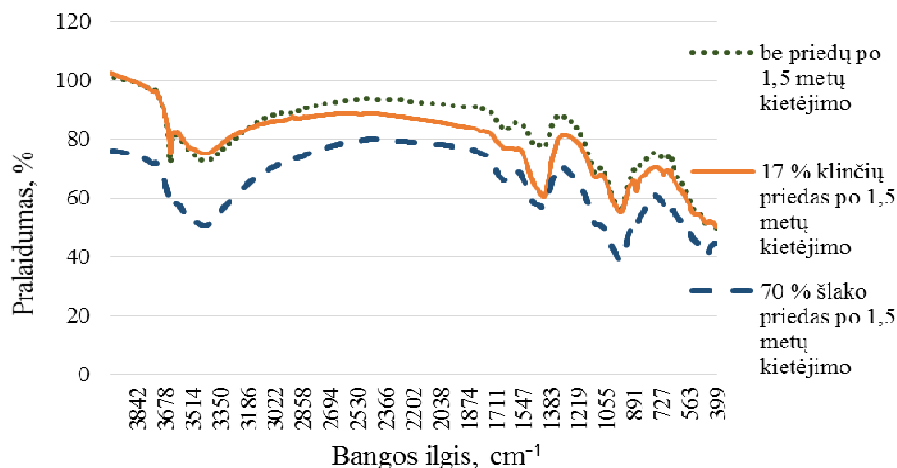
Atlikus tyrimus su daug šlako turinčiu cementu (3.14 pav.), DTG kreivė arba masės pokyčių greitis po 28 parų ir 1,5 metų hidratacijos rodo labai nedidelį laisvojo vandens pokytį. Po ilgos hidratacijos trukmės laisvojo vandens nežymiai sumažėja o kalcio hidrosilikatų kiekis išlieka tas pats.

Siekiant išsiaiškinti skirtumus tarp cementų su skirtingais mineraliniais priedais buvo atlikti infraraudonųjų spindulių spektroskopijos tyrimai. Gauti spektrai pavaizduoti 3.15–3.18 paveiksluose. Gautos IR kreivės rodo skirtumus tarp cemento mineralinių priedų (3.15 pav.). Kai bangos ilgis yra 874 cm^{-1} atsiranda kalcio karbonatų virpėjimas (CO_3), kurių didesnis kiekis užfiksuotas cemente su 70 % ir 17 % šlako kiekiu. Kai bangos ilgis yra 965 cm^{-1} atsiranda SiO_4 vibracija. Kai bangos ilgis yra 1477 cm^{-1} ir 1422 cm^{-1} atsiranda karbonatų (CO_3) virpėjimas, kurių didžiausias kiekis cemente su 17 % klinties priedu. Kai bangos ilgis yra 1657 cm^{-1} ir 3431 cm^{-1} užfiksuotas vandens molekulių (H_2O) virpėjimas. Kai bangos ilgis yra 3642 cm^{-1} atsiranda kalcio hidroksido (OH) virpėjimas.



3.15 pav. Cementinio akmens su skirtingais cemento mineraliniais priedais po 28 parų kietėjimo infraraudonųjų spindulių spektroskopinės kreivės

Fig. 3.15. Infrared spectroscopy curves of hardening cement paste with different cement mineral additives after 28 days

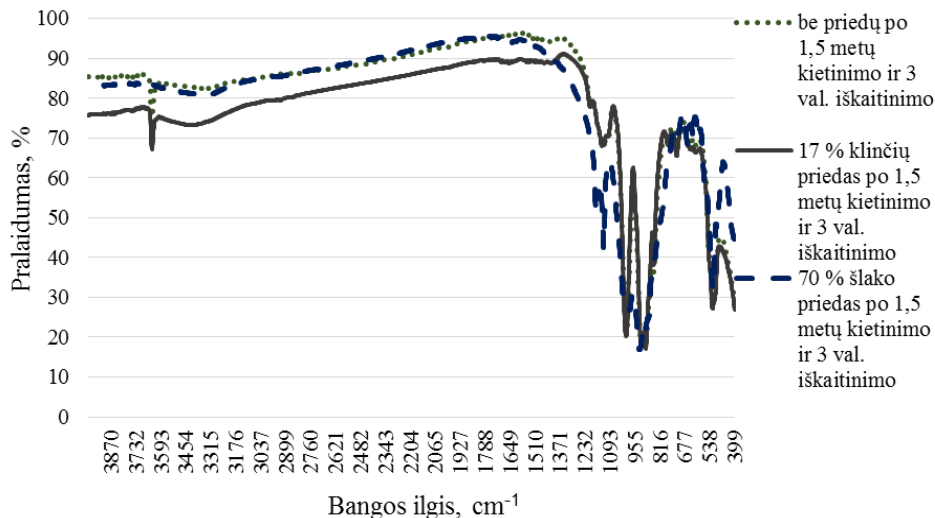


3.16 pav. Cementinio akmens su skirtingais cemento mineraliniais priedais po 1,5 metų kietėjimo infraraudonųjų spindulių spektroskopinės kreivės

Fig. 3.16. Infrared spectroscopy curves of hardening cement paste with different cement mineral additives after 1.5 years

Atlikus cementinio akmens su skirtingais priedais tyrimus po 1,5 metų (3.16 pav.) pastebimi didesni hidratacijos skirtumai cemente su 70 % šlako

priedu. Pagrindiniai skirtumai atsiranda kai bangos ilgis yra 965 cm^{-1} , kur fiksuojama SiO_4 vibracija ir bangos ilgiui 3431 cm^{-1} , kur fiksuojama vandens molekulių (H_2O) virpėjimas.



3.17 pav Cementinio akmens su skirtingais cemento mineraliniais priedais po 1,5 metų kietėjimo ir 3 valandų temperatūrinio poveikio infraraudonųjų spindulių spektroskopinės kreivės

Fig. 3.17. Infrared spectroscopy curves of hardening cement paste with different cement mineral additives after 1.5 years and 3 hours of heating

Atlikus bandymus su cementiniu akmeniu su skirtingais cemento mineraliniais priedais, kuris buvo kaitinamas 3 valandas pagal standartinę gaisro kreivę (3.17 pav.), pastebimas žymus kreivių pokytis. Kai bangos ilgis yra 464 cm^{-1} tada atsiranda SiO_4 vibracija. Kai bangos ilgis yra 874 cm^{-1} atsiranda CO molekulių vibracija. Nebelieka H_2O vibracijos ties 3431 cm^{-1} bangos ilgiu. Šie rezultatai rodo kalcio hidroksido išnykimą cementiniuose bandiniuose po temperatūrinio poveikio ir labai mažą vandens kiekį, arba visišką jo nebuvimą.

Galima pabrėžti, kad didelių skirtumų IR spektruose nepastebėta ir IR spektrai nėra jautrūs kiekybiniais atskirų grupių pokyčiams.

3.1.4. Mineralinio priedo įtaka betono savybių pokyčiams veikiant aukštai temperatūrai

Betono masės nuostoliai gauti kaitinant vienpusiu atsparumo ugniai vertinimo metodu ir nustatyti remiantis šio darbo 2.5.2 skyrelyje aprašytu apskaičiavimu. Masės nuostoliai betone su skirtingais cementais pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Masės nuostoliai betono bandiniuose su skirtingais cementais**Table 3.1.** Weight loss of concrete samples with different cements

Sudėties žymuo	Masės nuostolis po 3 val. kaitinimo, %
C1N (be priedo)	8,3
C1R (smulkiai maltas)	8,29
C2L (17 % klinčių priedas)	8,98
C2S (17 % šlako priedas)	9,1
C3 (70 % šlako priedas)	50,5 (po 30 min)*

* – sprogstamasis irimas

Betono su skirtingais cementais masės nuostoliai kinta nuo 8,29–9,1 %, tai rodo, kad mineralinis priedas cemento neturi didelės įtakos cementinio akmens irimo procesams veikiant aukštai temperatūrai. Su 70 % šlako turinčiu cementu (C3), dėl vykstančios sprogstamosios irties atsiranda dideli masės nuostoliai. Jie atsiranda dėl didelio kiekio laisvojo vandens pasišalinimo ir sukeliamos cementinės matricos destrukcijos. Bandymu metu praėjus 30 minučių, buvo užfiksuotas 50,5 % masės nuostolis. Gauti dideli masės nuostolių skirtumai nuo 8,3 % iki 50,5 %, parodo betoninių konstrukcijų galimą elgseną ugnyje ir keliamą pavojų laikančioms konstrukcijoms panaudojus netinkamą cementą.

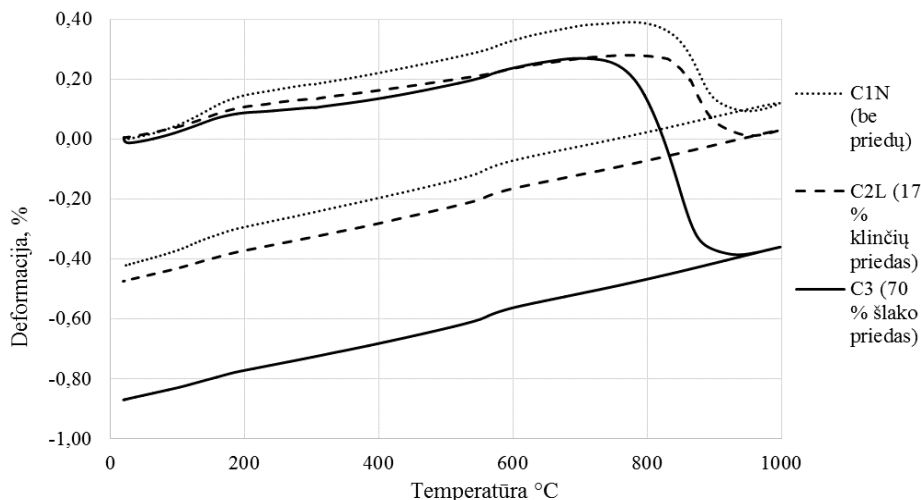
Ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimas betone su skirtingais cementais nustatytas remiantis šio darbo 2.5.2 skyrelyje aprašyta metodika. Gauti rezultatai pateikti 3.2 lentelėje. Suformuotose betono bandiniuose su skirtingais cementais, ultragarsas greičiausiai sklinda su 17 % turinčiu klinties priedo, mažiausias sklaidimo greitis užfiksuotas su cementu be priedu. Paveikus betono bandinius temperatūra 3 valandas iš vienos pusės pagal standartinę temperatūros – laiko kreivę, didžiausias ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimas gautas su 17 % šlako turinčiu cementu (40,9 %). Mažiausi pokyčiai užfiksuoti betone su smulkiai maltu cementu (20,6 %) ir su 17 % klinties turinčiu cementu (23,9 %). Ultragarso sklaidimo greičio nepavyko užfiksuoti betone su 70 % šlako turinčiu cementu, nes bandiniai suiro sprogstamosios irties būdu.

3.2 lentelė. Ultragarso sklaidimo greitis betono bandiniuose su skirtingais cementais**Table 3.2.** Ultrasonic velocity of concrete samples with different cements

Sudėties žymuo	Ultragarso sklaidimo greitis prieš kaitinimą, m/s	Ultragarso sklaidimo greitis po 3 val. kaitinimo, m/s	Ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimas, %
C1N (be priedo)	3984	2558	35,8
C1R (smulkiai maltas)	4028	3197	20,6
C2L (17 % klinties priedas)	4143	3154	23,9
C2S (17 % šlako priedas)	4032	2382	40,9
C3 (70 % šlako priedas)	4030	Nenustatyta*	–

* – sprogstamasis irimas

3.18 paveiksle pateikti betono su šamoto užpildu ir skirtingais cementais temperatūrinių deformacijų kreivės.



3.18 pav. Betono bandinių su skirtingais cementais terminis išsiplėtimas ir susitraukimas

Fig. 3.18. Concrete samples thermal expansion and shrinkage with different cements

Didžiausias terminis plėtimasis kaitinant užfiksuotas betono bandiniuose su cementu be mineralinių priedų (C1N) ir siekia 0,4 %. Tačiau pasiekus apie 800 °C temperatūrą vyksta staigus cementinio akmens susitraukimas beveik iki pradinių bandinio matmenų. Vykstant bandinio aušinimui betono bandinys traukiasi analogiškai išsiplėtimui ir pasiekia minusinę – 0,4 % deformacijos reikšmę. Didžiausias betono susitraukimas prie 800 °C temperatūros vyksta su šlakiniu cementu, dėl didelio susidarančio skystosios fazės kiekio šiame cimente minėtoje temperatūroje (Hekpacov 1957). Aušinant betoną su šlakiniu cementu vyksta terminio susitraukimo deformacija analogiška kitų betonų susitraukimo deformacijoms. Temperatūrinės deformacijos betone yra labai svarbios dėl gniuždymo stiprio praradimų aiškinimo, nes vykstant deformacijoms suardoma kontaktinė zona tarp užpildo ir cementinės matricos, todėl paveikus betoną aukšta temperatūra yra prarandamas gniuždymo stipris ir gelžbetoninių konstrukcijų laikomoji galia.

Betono gniuždymo stipris nustatytas remiantis šio darbo 2.5.2 poskyriuje aprašyta metodika. Betono bandinių, veikiamų temperatūrinio režimo pagal vienpusį atsparumo ugniai bandymų metodą, gniuždymo stiprio sumažėjimas pateiktas 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Betono bandinių su skirtingais cementais gniuždymo stipris**Table 3.3.** Concrete compressive strength of samples with different cements

Rodikliai	C1N (be priedų)	C1R (smulkiai maltas)	C2L (17 % klinties priedas)	C2S (17 % šlako priedas)	C3 (70 % šlako priedas)
Gniuždymo stipris prieš kaitinimą, MPa	36,7	39,3	36,8	35,1	31,3
Gniuždymo stipris po 3 val. kaitinimo, MPa	25,8	28,7	32,2	24,4	25,4 (po 30 min)*
Gniuždymo stiprio sumažėjimas, %	29,7	27,0	12,5	30,5	18,8 (po 30 min)*

* – sprogstamasis irimas

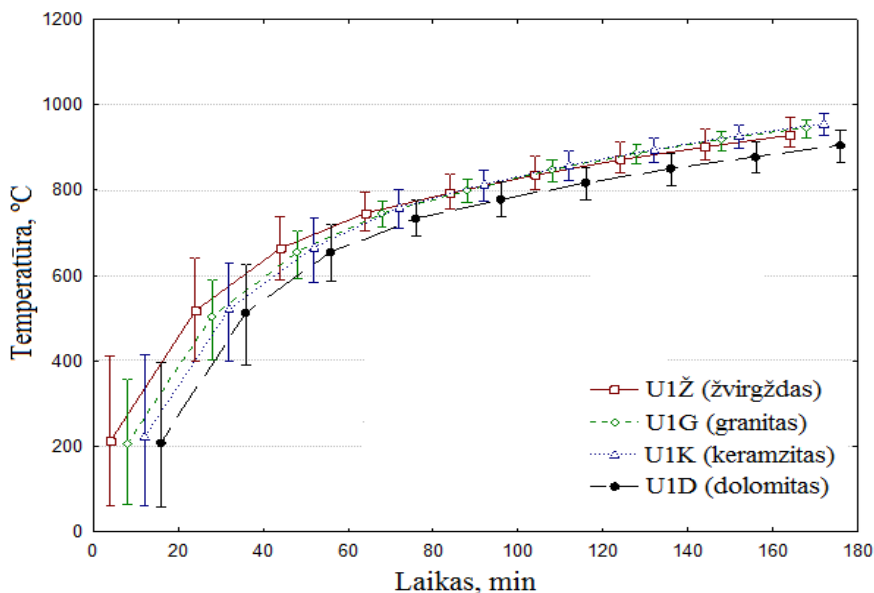
Betono bandinių su skirtingais cementais gniuždymo stipris skiriasi. Gauti rezultatai rodo, kad didžiausią gniuždymo stiprį turi bandiniai su smulkiai maltu cementu (39,3 MPa), mažiausias gniuždymo stipris užfiksuotas su 70 % šlako priedo turinčiu cementu (31,3 MPa). Atlikus vienpusio kaitinimo bandymus, paaiškėjo, kad didžiausi pokyčiai įvyko su bandiniais turinčiais aukštakrosnių šlako priedo. Betono bandinių su 17 % šlako priedo turinčiu cementu gniuždymo stipris sumažėjo 30,5 %, su 70 % šlako turinčiu cementu 18,8 %. Reikia atkreipti dėmesį, kad betone su 70 % turinčiu šlako priedo vyko sprogstamoji irtis ir šis rezultatas pateiktas po 30 minučių bandymo. Mažiausi gniuždymo stiprio pokyčiai įvyko bandiniuose su 17 % klinties priedo turinčiu cementu (12,5 %). Šie rezultatai leidžia daryti išvadą, kad klinties priedas turi teigiamą įtaką betono atsparumui ugniai. Galima daryti prielaidą, kad betono stiprumo sumažėjimui lemiamą įtaką turi vandens kiekis ir cementinio akmens laidumas vandeniui ir jo garams. Cemente su klinties priedu yra mažesnis klinkerio kiekis ir po sukietėjimo yra gaunamas mažesnio tankio ir laidesnis cementinis akmuo. Kuo didesnis šlako kiekis tuo mažesnio laidumo cementinis akmuo susidaro ir mažėja betono atsparumas ugniai arba pasireiškia sprogstamoji irtis.

3.2. Užpildų įtaka betono atsparumui ugniai

3.2.1. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais užpildais esant vienpusiam temperatūros poveikiui

Vertinant skirtingų užpildų įtaką betono atsparumui ugniai, atlikti temperatūros pasiskirstymo bandinių skerspjūvyje tyrimai naudojant vienpusę atsparumo ugniai bandymo metodiką. Bandiniai buvo kaitinami 3 valandas. Tyrimams

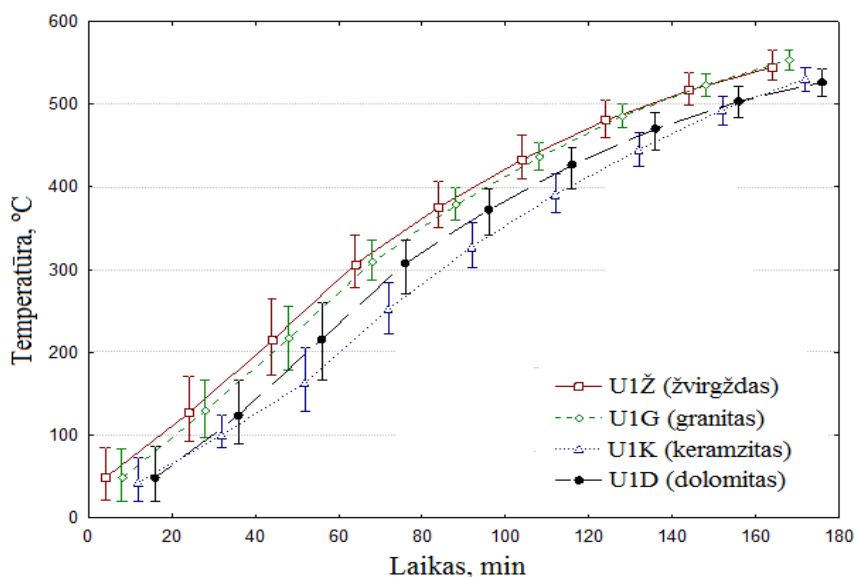
buvo parinkti keturi dažniausiai naudojami užpildai: žvirgždas (frakcija 4/16), dolomito skalda (frakcija 4/16), granito skalda (frakcija 4/16) ir keramzitas (frakcija 4/16) (lengvasis užpildas) ir du skirtingi cementai, cementas be priedų (CEM I 42,5N) ir su 17 % klinties priedų (CEM II/A–LL 42,5N). Betono sudėtys pateiktos 2.9 lentelėje. Betono bandinių su cementu be priedų perkaitimo kreivės pateiktos 3.19–3.20 paveiksluose.



3.19 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais užpildais ir CEM I 42,5N cementu 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiai

Fig. 3.19. Temperature distribution in concrete samples with different aggregate and CEM I 42,5N cement from 1 cm distance from the heated surface of the one side heating

Bandiniuose su skirtingais užpildais (3.19 pav.), temperatūra laiko bėgyje kinta pagal logaritminį dėsnį. Kreivės forma panaši į standartinio gaisro kreivę. Bandymo pradžioje fiksuojama didesnė duomenų sklaida, bandymo pabaigoje duomenų sklaida sumažėja. Aukščiausia temperatūra iki 700 °C pasiekama su žvirgždo užpildu, o mažiausia su dolomito bei keramzito užpildais. Po ilgesnio kaitinimo laiko temperatūros išsilygina išskyrus dolomito užpildą, kuriama temperatūra išlieka mažesnė, negu betone su kitais užpildais.



3.20 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandinyje su skirtingais užpildais ir CEM I 42,5N cementu 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiu būdu

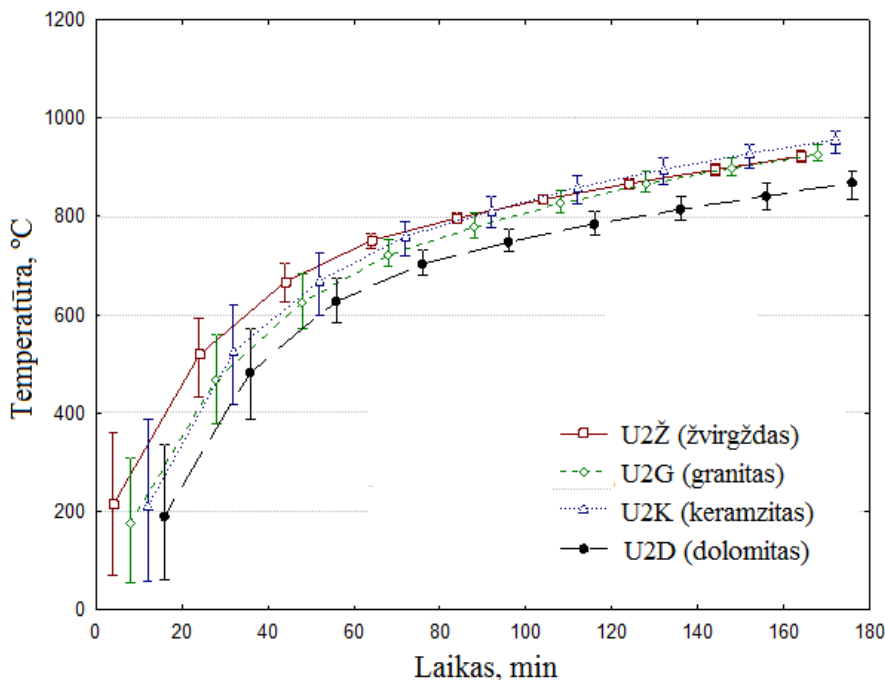
Fig. 3.20. Temperature distribution in concrete samples with different fillings and CEM I 42,5 cement from 5 cm distance from the heated surface of the one side heating

Bandiniuose su skirtingais užpildais 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus matomas tiesinis temperatūros pasiskirstymas laiko bėgyje. Duomenų sklaida tiek bandymo pradžioje, tiek pabaigoje yra panaši. Aukščiausios temperatūros fiksuojamos betono su žvirgždo ir granito užpildais, žemesnės temperatūros fiksuojamos su dolomito o žemiausios su keramzito užpildais.

Betono bandinių su skirtingais užpildais ir cementu turinčiu 17 % klinties priedo (CEM II/A-LL 42,5N) temperatūros pasiskirstymo kreivės pateikiamos 3.21–3.22 paveiksluose.

Bandiniuose su skirtingais užpildais ir cementu, turinčiu 17 % klinties priedo (3.21 pav.), temperatūra pasiskirsto analogiškai bandiniams su cementu be priedų. Kreivės forma panaši į standartinio gaisro kreivę. Bandymo pradžioje fiksuojama didesnė duomenų sklaida, bandymo pabaigoje duomenų sklaida sumažėja. Aukščiausia temperatūra iki 700 °C pasiekama su žvirgždo užpildu, žemiausia temperatūra pasiekama su keramzito ir dolomito užpildais. Po ilgesnio kaitinimo laiko temperatūros išsilygina, išskyrus dolomito užpildą, kuriame temperatūra išlieka mažesnė negu betone su kitais užpildais. Panaudojus

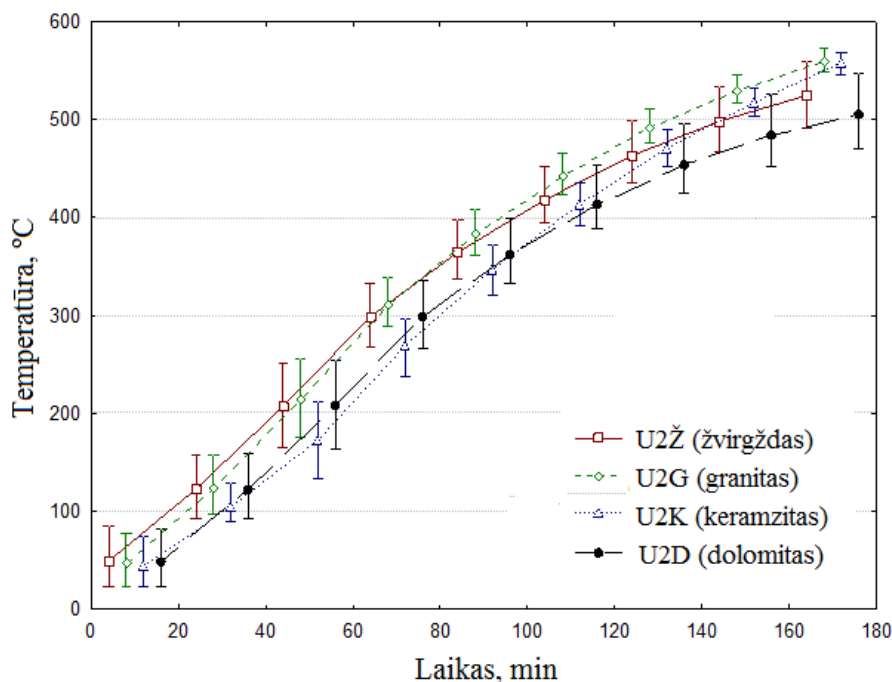
cementą su klinties priedu, temperatūrą 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus po 3 valandų kaitinimo galima sumažinti nuo 912 °C iki 873 °C.



3.21 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais užpildais ir CEM II A-LL 42,5N cementu 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiu būdu

Fig. 3.21. Temperature distribution in concrete samples with different fillings and CEM II A-LL 42,5N cement from 1 cm distance from the heated surface of the one side heating

Bandiniuose su skirtingais užpildais ir cementu turinčiu 17 % klinties priedo nustatant temperatūros pasiskirstymą 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus (3.22 pav.) gaunamas beveik tiesinis temperatūros pokytis laiko bėgyje. Duomenų sklaida tiek bandymo pradžioje, tiek pabaigoje yra vienoda. Didžiausia temperatūra bandinio centre pasiekama su žvirgždu, mažiausia temperatūra pasiekama su keramzito ir dolomito užpildais. Betono su klinties priedu ir dolomitiniu užpildu temperatūra bandinio centre gaunama mažesnė (509 °C) palyginus su bandiniu, kuriame naudotas cementas be priedų (531 °C).



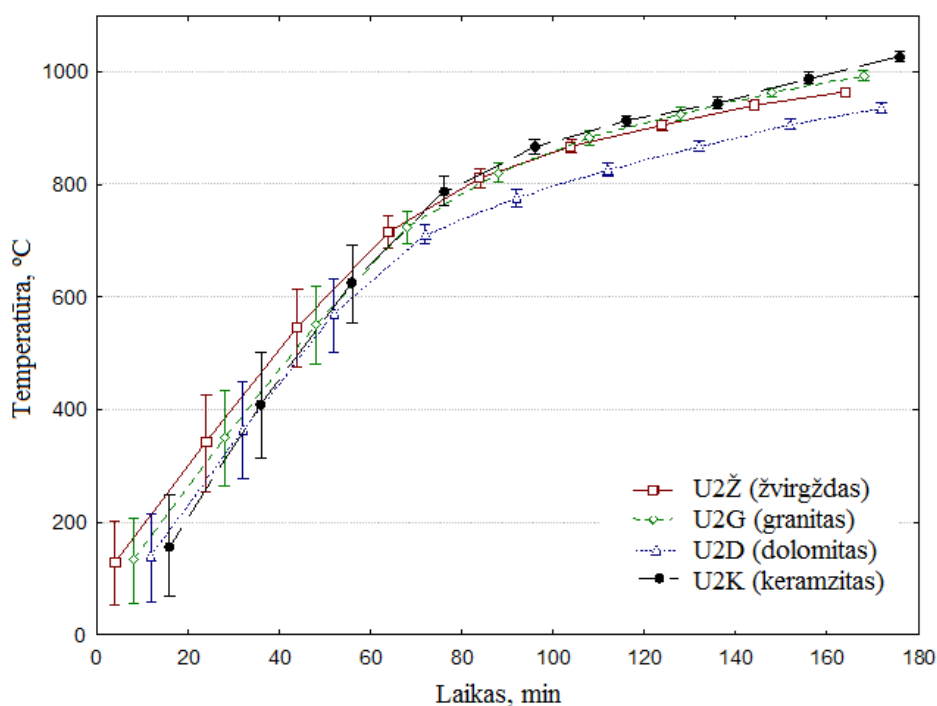
3.22 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais užpildais ir CEM II A-LL 42,5N cementu 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiai

Fig. 3.22. Temperature distribution in concrete samples with different fillings and CEM II A-LL 42,5 cement from 5 cm distance from the heated surface surface of the one side heating

Remiantis gautais rezultatais galima teigti, kad mažiausios temperatūros bandinio paviršiuje, bei bandinio centre pasiekiamos betone, kuriame panaudotas dolomito užpildas. Didžiausia temperatūra bandinio 5 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus po 3 valandų kaitinimo gauta su betono bandiniais, kuriuose panaudotas dolomito užpildas: su CEM I cementu 5 cm atstume gauta 531 °C temperatūra su CEM II A-LL cementu – 509 °C. Didžiausia betono temperatūra 5 cm atstume su skirtingais užpildais ir CEM I cementu užfiksuota su granito užpildu – 560 °C, su CEM II A-LL cementu užfiksuota taip pat su granito užpildu – 567 °C.

3.2.2. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingais užpildais esant tūriniam temperatūros poveikiui

Norint ištirti skirtingų užpildų įtaką betono atsparumui ugniai buvo atlikti betono bandinių su skirtingais užpildais tyrimai, panaudojant tūrinio atsparumo ugniai bandymų metodą pagal standartinę gaisro kreivę. Bandiniai buvo kaitinami tris valandas. Tyrimams buvo parinkti keturi dažniausiai naudojami užpildai: žvirgždas, dolomito skalda, granito skalda ir keramzitas. Bandiniai suformuoti su cementu turinčiu 17 % klinčių priedo. Betono sudėty pateiktos 2.9 lentelėje. Betono bandinių perkaitimo kreivės pateikiamos 3.23–3.24 paveiksluose.



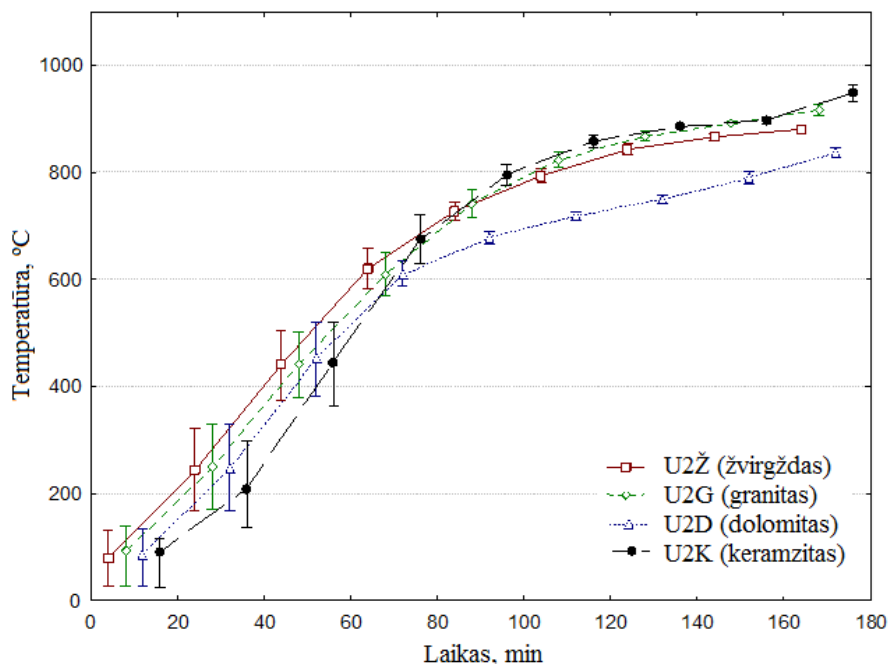
3.23 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais užpildais 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant tūriniu būdu

Fig. 3.23. The temperature distribution of the concrete samples with different aggregates 1 cm distance from the heated surface of the volumetric heating

Betono bandiniuose su skirtingais užpildais (3.23 pav.) 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus po 3 valandų temperatūra didėja vienodai. Įvertinus temperatūros nustatymo paklaidas, galima teigti, kad temperatūros bandinių paviršiuje pasiskirsto vienodai.

Betono bandiniuose su skirtingais užpildais (3.24 pav.) 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus iki 600 °C temperatūros pastebėtas beveik vienodas temperatūros augimas o aukštesnėse temperatūrose gaunamas didesnis temperatūros verčių išsibarstymas.

Iš 3.23 ir 3.24 paveiksluose pateiktų kreivių galima matyti, kad naudojant tūrinį kaitinimą 1 ir 5 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus temperatūros bandiniuose su skirtingais užpildais pasiskirsto nedideliame intervale: 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus 945–1035 °C, 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus 846–964 °C. Žemiausios temperatūros gautos su dolomito užpildu ir siekė: 1 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus 945 °C, 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus 846 °C.



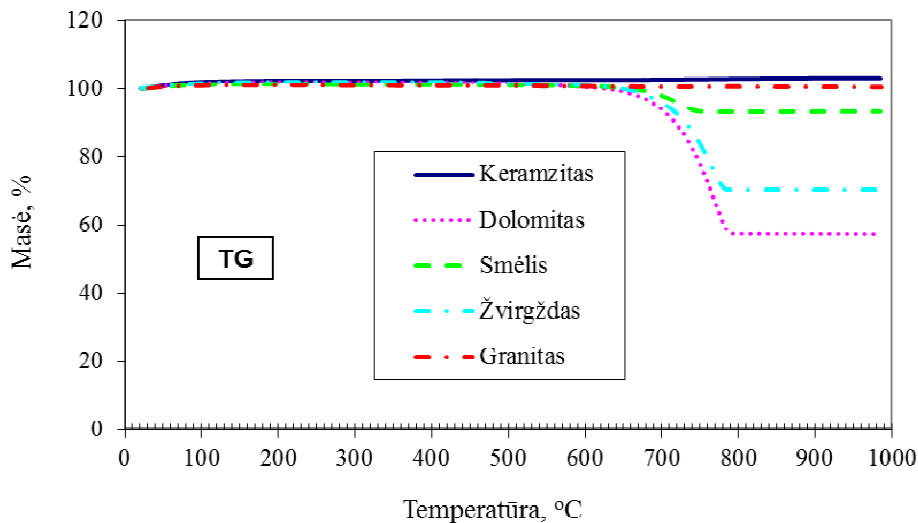
3.24 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais užpildais 5 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant tūriniu būdu

Fig. 3.24. The temperature distribution of the concrete samples with different aggregates 5 cm distance from the heated surface of the volumetric heating

Iš gautų tyrimų rezultatų galima daryti išvadą, kad dolomito užpildas turi teigiamą poveikį atsparumui ugniai lyginant su kitais užpildais, tačiau dėl mažų betono bandinių matmenų tūrinis bandymų metodas yra mažiau tikslus lyginant su vienušiu kaitinimo metodu.

3.2.3. Destrukciniai procesai užpilduose veikiant aukštai temperatūrai

Siekiant išsiaiškinti skirtingų užpildų įtaką, buvo atlikti termogravimetriniai tyrimai. Tyrimui pasirinkti penki skirtingi užpildai: keramzitas, dolomitas, smėlis, žvirgždas, granitas. 3.25 paveiksle pateiktos masės nuostolių nuo temperatūros kreivės (TG).



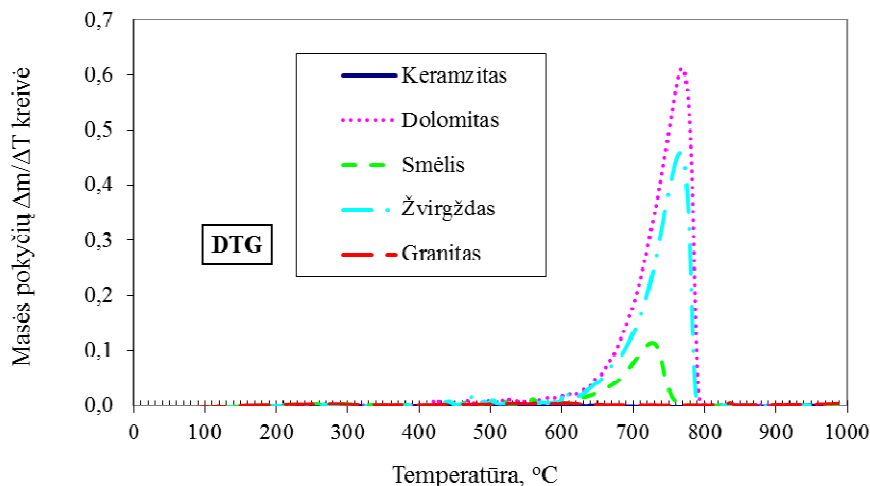
3.25 pav. Skirtingų užpildų termogravimetrinės kreivės

Fig. 3.25. Different types of aggregate termogravimetric curves

Remiantis termogravimetrijos kreivėmis (TG kreivės) galima įvardinti tokius užpildų skirtumus. Keramzito ir granito užpildai yra inertiški temperatūros poveikiui iki 1000 °C, nes temperatūriniai skilimai neužfiksuoti ir neužfiksuotas masės praradimas. Iš literatūros šaltinių ir gautų TG kreivių galima įvardinti, kad smėlio, žvirgždo ir dolomito užpilduose yra kalcio ir magnio karbonatų, kurie skyla esant 650–800 °C temperatūrai (Naujokaitis 2006; Balandis *et al.*, 2004). Didžiausi masės nuostoliai intervale 650–800 °C užfiksuoti su dolomito užpildu ir siekia 42,5 %, su žvirgždo užpildu – 29,7 %, su smėlio užpildu – 6,7 %. Todėl galima teigti, kad masės nuostolių požiūriu tinkamiausi užpildai yra keramzitas ir granitas. Gamtinis smėlis taip pat pasižymi nedideliais masės nuostoliais veikiant aukštai temperatūrai.

Remiantis diferencinės termogravimetrijos rezultatais (DTG kreivėmis, 3.26 pav.) masės pokyčiai fiksuojami tik 650–780 °C temperatūros intervale. Didžiausios masės pokyčių greičio vertės yra užfiksuotos dolomite ir žvirgžde,

mažesnės – smėlyje. Visiškai masės pokyčio greitis neužfiksuotas keramzite ir granite.



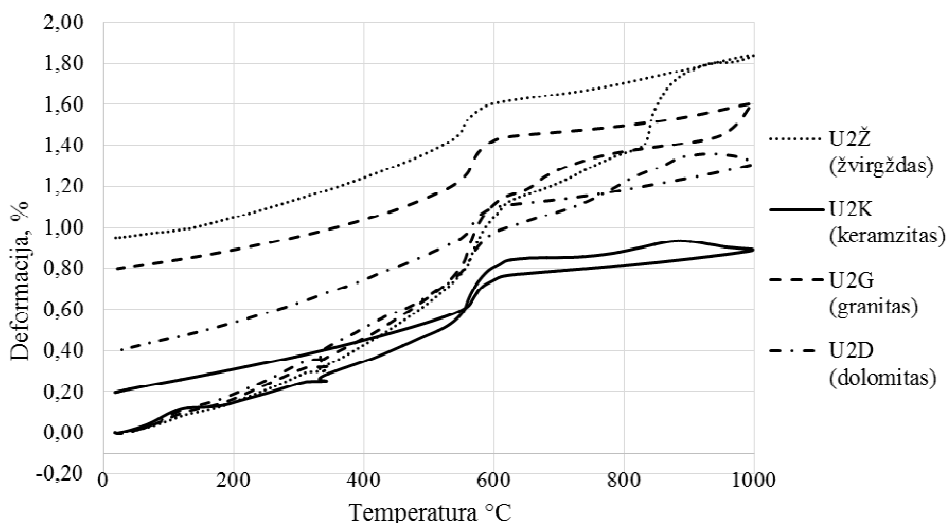
3.26 pav. Skirtingų užpildų diferencinės termogravimetrijos kreivės

Fig. 3.26. Differential thermogravimetric curves of different aggregates

3.27 paveiksle pateikiama betono bandinių su skirtingais stambiaisiais užpildais terminio išsiplėtimo dilatometrinės kreivės. Betono sudėtis pateikta 2.9 lentelėje.

Visiems betono bandiniams būdingas išsiplėtimas pasiekus 573 °C temperatūrą, kadangi visi betonai pagaminti su smulkiuoju užpildu smėliu, kuriame didžiąją dalį sudaro kvarco mineralas. Kvarcas prie šios temperatūros keičia kristalinę gardelę iš β į α , kas sukelia tūrinės deformacijas. Didžiausios deformacijos minėtoje temperatūroje pastebėtos betone su granito stambiuoju užpildu, kuriame yra papildomas kiekis kvarco.

Bendrosios deformacijos betono su skirtingais užpildais yra didžiausios naudojant žvirgždo užpildą, kurios siekia apie 1,0 %, su granito užpildu siekia 0,8 %, su dolomito užpildu siekia 0,4 % o mažiausios deformacijos užfiksuotos su keramzito užpildu, kurios siekia 0,2 %. Todėl tinkamiausi ugniai atsparumo požiūriu betono stambiaji užpildai yra keramzitas (lengvajam betonui) ir dolomitas.



3.27 pav. Betono bandinių su skirtingais užpildais terminis išsiplėtimas ir susitraukimas

Fig. 3.27. Thermal expansion and shrinkage of concrete samples with different aggregates

Didžiausias plėtimasis kaitinant užfiksuotas betono bandiniuose su žvirgždo užpildu ir siekia apie 1,8 %, tačiau vykstant bandinio aušinimui betono bandinys traukiasi ir pasiekia 1,0 % reikšmę. Mažiausias betono bandinių plėtimasis užfiksuotas su keramzito užpildu ir siekia 0,8 % ribą, vėstant bandiniui išsiplėtimas mažėja ir pasiekia apie 0,2 % ribą. Šie skirtumai aiškinami keramzito užpildo mineraline sudėtimi ir jo terminiu inertiškumu. Betono su dolomito užpildu terminis išsiplėtimas siekia 1,4 %, atvėsus bandinys pasiekia 0,4 % ribą, tai daro mažesnę įtaka betono destrukciniams procesams lyginant su kitais sunkiaisiais užpildais.

3.2.4. Užpildo mineralinės sudėties įtaka betono savybių pokyčiams veikiant aukštai temperatūrai

Betono su stambiaisiais užpildais masės nuostolių vertės po 3 valandų kaitinimo pateiktos 3.4 lentelėje. Betono masės nuostolių po kaitinimo rezultatai rodo, kad su visais užpildais gaunami panašūs masės nuostoliai (nuo 6,7 % iki 9,6 % su cementu be mineralinių priedų ir nuo 7,0 % iki 10,0 % su cementu su klinties priedu), išskyrus granito užpildą, kuris duoda masės nuostolius 5,3 % ir 6,0 % atitinkamai cementu be priedu ir su klinties priedu. Rezultatai rodo, kad

granito stambusis užpildas, sukelia mažiausius masės nuostolius betone veikiant aukštai temperatūrai.

3.4 lentelė. Betono bandinių su skirtingais užpildais masės nuostoliai po kaitinimo

Table 3.4. Concrete samples with different fillings weight loss after heating

Sudėties žymuo	Masės nuostoliai po 3 val. kaitinimo, kai cemento tipai skirtingi, %	
	CEM I 42,5N	CEM II/A–LL 42,5N
U2Ž (žvirgždas)	6,67	7,04
U2D (dolomitas)	9,32	9,20
U2G (granitas)	5,33	5,98
U2K (keramzitas)	9,61	9,95

Ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimas po vienpusio kaitinimo betonuose su skirtingais užpildais pateiktas 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Ultragarso sklaidimo greitis betono bandiniuose su skirtingais užpildais ir skirtingais cemento tipais

Table 3.5. Ultrasonic velocity of concrete samples with different aggregates and different types of cement

Sudėties žymuo	Ultragarso sklaidimo greitis prieš kaitinimą, m/s	Ultragarso sklaidimo greitis po 3 val. kaitinimo, m/s	Ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimas, %
U1Ž (žvirgždas)	4826	1327	75,5
U2Ž (žvirgždas)	4809	1364	71,6
U1D (dolomitas)	4926	1164	76,4
U2D (dolomitas)	4828	1645	65,9
U1G (granitas)	4891	1200	75,5
U2G (granitas)	4800	1067	77,8
U1K (keramzitas)	3929	1526	61,2
U2K (keramzitas)	3863	1501	61,1

Suformuotose betono bandiniuose su skirtingais užpildais, ultragarsas greičiausiai sklinda su dolomito užpildu ir siekia 4926 m/s. Mažiausias sklaidimo greitis užfiksuotas betone su keramzito užpildu ir siekia 3863 m/s. Paveikus betono bandinius temperatūra 3 valandas iš vienos pusės pagal standartinę gaisro kreivę, didžiausias ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimas gautas su 17 % klinčių priedo turinčiu cementu ir granito užpildu, pokytis siekia 77,8 %. Mažiausiai pakinta betono bandiniai su keramzito užpildu jie siekia 61,1 % ir su dolomito užpildu 65,9 %. Užfiksuoti mažiausi pokyčiai gali būti aiškinami keramzito terminiu inertiškumu ir didelėmis granito užpildo deformacijomis veikiant aukštai temperatūrai.

Betonų su cementu be priedų ir skirtingais stambiaisiais užpildais (žvirgždu, dolomitu, granitu) ultragarso sklaidimo greitis po kaitinimo sumažėja beveik vienodai – apie 76 %, o su cementu su klinties priedu mažiausias sumažėjimas gaunamas su dolomito užpildu ir siekia 66 %. Remiantis gautais ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimo rezultatais galima teigti, kad tinkamiausias stambusis užpildas normaliajam betonui yra dolomitas.

Betono su skirtingais stambiaisiais užpildais gniuždymo stipris pateiktas 3.6 lentelėje, gniuždymo stiprio sumažėjimas po 3 val. temperatūrinio poveikio pagal standartinę gaisro kreivę pateiktas 3.28 paveiksle (su cementu be priedų) ir 3.29 paveiksle (su cementu kuriame yra 17 % klinties priedo).

3.6 lentelė. Betono bandinių gniuždymo stipris su skirtingais užpildais prieš kaitinimą ir po 3 val. temperatūrinio poveikio

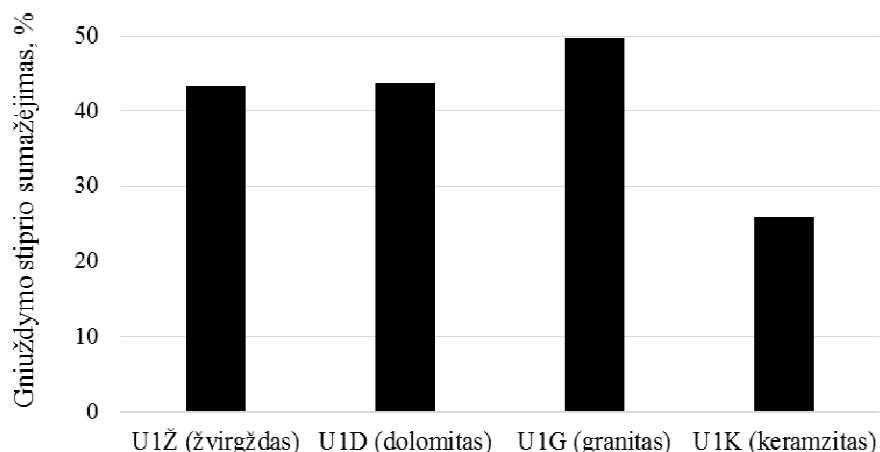
Table 3.6. Concrete samples compressive strength with different aggregate before heating and after 3 hours heating

Sudėties žymuo	Gniuždymo stipris prieš kaitinimą, MPa	Gniuždymo stipris po 3 val. kaitinimo, MPa
U1Ž (žvirgždas)	59,2	33,5
U1D (dolomitas)	59,7	33,6
U1G (granitas)	67,8	34,1
U1K (keramzitas)	20,1	14,9
U2Ž (žvirgždas)	63,0	33,8
U2D (dolomitas)	57,3	32,4
U2G (granitas)	61,5	32,5
U2K (keramzitas)	15,9	12,0

Betono bandinių su skirtingais užpildais gniuždymo stipris skiriasi. Gauti rezultatai rodo, kad didžiausią gniuždymo stiprį turi bandiniai su CEM I 42,5R cementu ir granito užpildu (67,8 MPa), mažiausias gniuždymo stipris užfiksuotas su CEM II/A–LL 42,5N cementu ir keramzito užpildu (lengvajam betonui) (15,9 MPa).

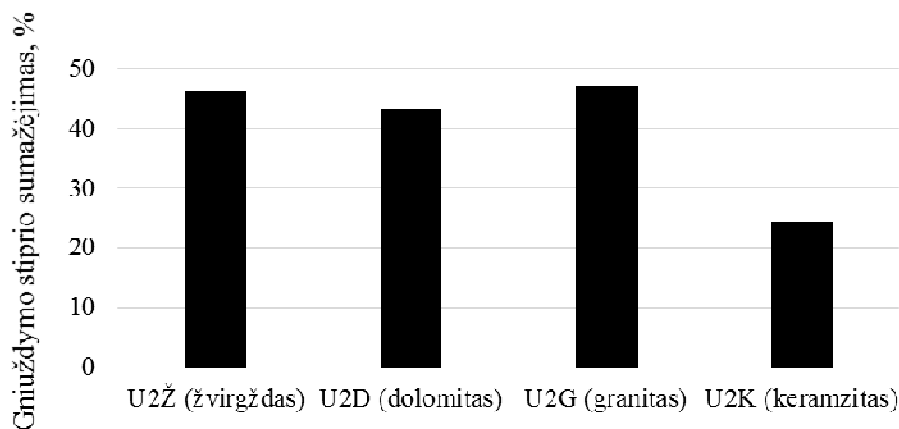
Iš gautų rezultatų, kurie pateikti 3.28 paveiksle, galima pastebėti, kad žymiai mažesnis gniuždymo stiprio sumažėjimas yra užfiksuotas su keramzito stambiuoju užpildu, kuris siekia 25 %. Su sunkiaisiais užpildais (žvirgždas, dolomitas, granitas) didžiausias gniuždymo stiprio sumažėjimas gaunamas su granito užpildu ir siekia 49,7 % su cementu be priedu ir 47,1 % su cementu su 17 % klinties priedu. Normaliųjų betonų su žvirgždo skalda stiprumo sumažėjimas siekia 43,4 % su cementu be priedų ir 46,3 % su cementu su klinties priedu. Mažiausias gniuždymo stiprio sumažėjimas gaunamas su dolomito už-

pildu jis siekia 43,7 % su cementu be priedų ir 43,4 % su cementu su klinties priedu.



3.28 pav. Betono bandinių su cementu be priedų ir skirtingais užpildais gniuždymo stiprio sumažėjimas

Fig. 3.28. Concrete samples compressive strength decrease with cement without additives and different aggregates



3.29 pav. Betono bandinių su cementu su 17 % klinties priedu ir skirtingais užpildais gniuždymo stiprio sumažėjimas

Fig. 3.29. Concrete samples compressive strength decrease with cement with 17% limestone additive and different aggregates

Tyrimų rezultatai rodo, kad tinkamiausias atsparumo ugniai požįūriu sunkus užpildas yra dolomitas, kurio stiprumo sumažėjimas yra mažiausias. Granito sunkus užpildas netinkamas naudoti atsparumo ugniai požįūriu betonuose, nes su šiuo užpildu betono stiprumo sumažėjimas yra didžiausias.

3.3. Įtraukto oro kiekio įtaka betono atsparumui ugniai

3.3.1. Temperatūros pasiskirstymas betone su skirtingu oro kiekiu esant vienpusiam temperatūros poveikiui

Oro kiekio betono mišinyje matavimai atlikti pagal standartinę bandymo metodiką LST EN 12350–7 (naudojant slėginį metodą) pateikti 3.7 lentelėje. Didinant orą įtraukiančios įmaišos kiekį iki 0,6 %, oro kiekis betono mišinyje didėjo nuo 3,2 % iki 14,0 %. Didėjant oro kiekiui betono mišinyje suketėjusio betono stiprumas nežymiai mažėja, todėl norint gauti analogišką betono stiprumą su dideliu oro kiekiu (apie 10–14 %) buvo padidintas cemento kiekis ir sumažintas V/C santykis. Betono sudėtys pateiktos 2.10 lentelėje.

3.7 lentelė. Įtraukto oro kiekio betono mišinyje bandymų rezultatai

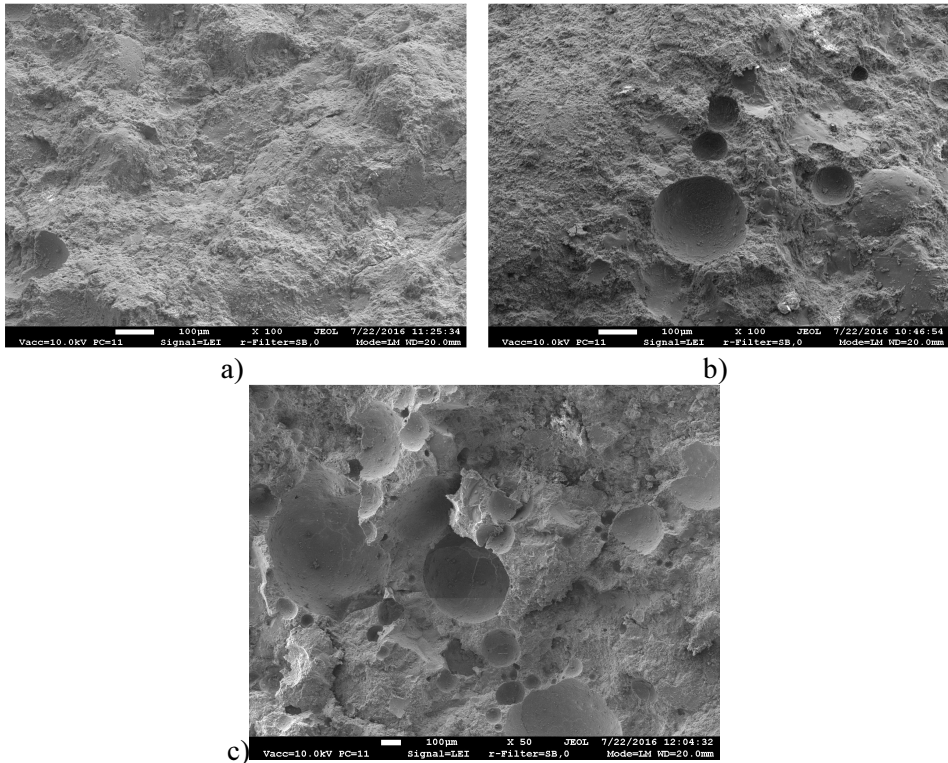
Table 3.7. Test results of entrained air in concrete mixture

Sudėties žymuo, %	Orą įtraukiančios įmaišos kiekis, %	Įtraukto oro kiekis betono mišinyje, %
O (įtraukto oro 3,2 %)	0	3,2
O–01 (įtraukto oro 4,0 %)	0,1	4,0
O–02 (įtraukto oro 5,0 %)	0,2	5,0
O–03 (įtraukto oro 10,0 %)	0,3	10,0
O–06 (įtraukto oro 14,0 %)	0,6	14,0
O–03P (įtraukto oro 8,5 %)	0,3	8,5
O–06P (įtraukto oro 12,0 %)	0,6	12,0

Suketėjusio betono su 3,2 %, 5,0 %, 14,0 % įtraukto oro kiekiu mikrostruktūros nuotraukos (didinimas 50–100 kartų) pateiktos 3.30 paveiksle.

Iš pateikto 3.30 paveikslo galima matyti betono bandinių su skirtingu įtraukto oro kiekiu skelto paviršiaus mikrostruktūrą, kuri skiriasi: a) nuotraukoje uždaryto oro porų kiekis nedidelis 1–2 vnt. 90 mm² plote, b) nuotraukoje uždaryto

oro porų kiekis didesnis apie 6 vnt. 90 mm² plote, c) nuotraukoje uždarų oro porų kiekis didelis – apie 10 vnt. 90 mm² plote.



3.30 pav. Betonų bandinių skelto paviršiaus mikrostruktūros nuotraukos:

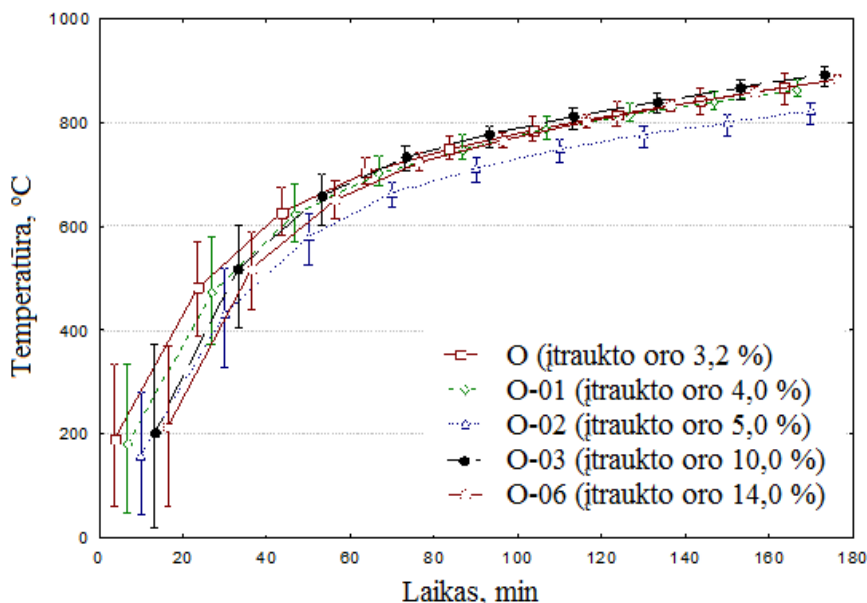
a) O (įtraukto oro 3,2 %); b) O-02 (įtraukto oro 5,0 %); c) O-06 (įtraukto oro 14,0 %)

Fig. 3.30. Concrete samples of splited surface microstructure photos:

a) O (3.2% entrained air); b) O-02 (5.0% entrained air); c) O-06 (14.0% entrained air)

Temperatūros pasiskirstymo skirtinguose betono sluoksniuose tyrimams, buvo naudojami betonai turintys skirtingą oro kiekį. Tyrimai atliekami pagal tą pačią vienpusio kaitinimo metodiką. Ištirti betonai, kurių oro kiekiai yra: 3,2 %, 4 %, 5 %, 10 %, 14 %, įmaišant orą įtraukiančios įmaišos kiekį atitinkamai: 0 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,6 %. Papildomai buvo atlikti bandymai su padidintu cemento kiekiu tam, kad išlaikyti tą patį betono stiprumą padidėjus oro kiekiui jame. Sumaišius betono mišinį su 0,3 % įtraukiančios įmaišos kiekiu, buvo gautas oro kiekis betone 8,5 %; su 0,6 % įmaiša buvo gautas oro kiekis 12 %. Betono sudėty pateiktos 2.10 lentelėje. Betono bandinių temperatūros pasiskirstymo kreivės su CEM II/A–LL 42,5N tipo cementu, dolomito užpildu ir skirtingu oro kiekiu pateikiamos 3.31–3.32 paveiksluose.

Betono bandiniuose su skirtingu oro kiekiu, temperatūra kyla pagal logaritminę dėsnį. Kreivės forma panaši į standartinio gaisro kreivę. Bandymo pradžioje fiksuojama didesnė duomenų sklaida, bandymo pabaigoje duomenų sklaida sumažėja. Iki 700 °C temperatūros aukščiausia temperatūra 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus gaunama betone be orą įtraukiančios įmaišos (sudėties žymuo O) su savaime įtrauktu oro kiekiu 3,2 %. Mažiausia temperatūra 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus gaunama su 5 % įtraukto oro kiekiu, gaunamu panaudojus 0,2 % įmaišos nuo cemento kiekio. Aukščiau 700 °C temperatūros 1 cm atstumu nuo paviršiaus temperatūra bandiniuose su skirtingu oro kiekiu susivienodina, tačiau betone su 5 % ji išlieka mažesnė.

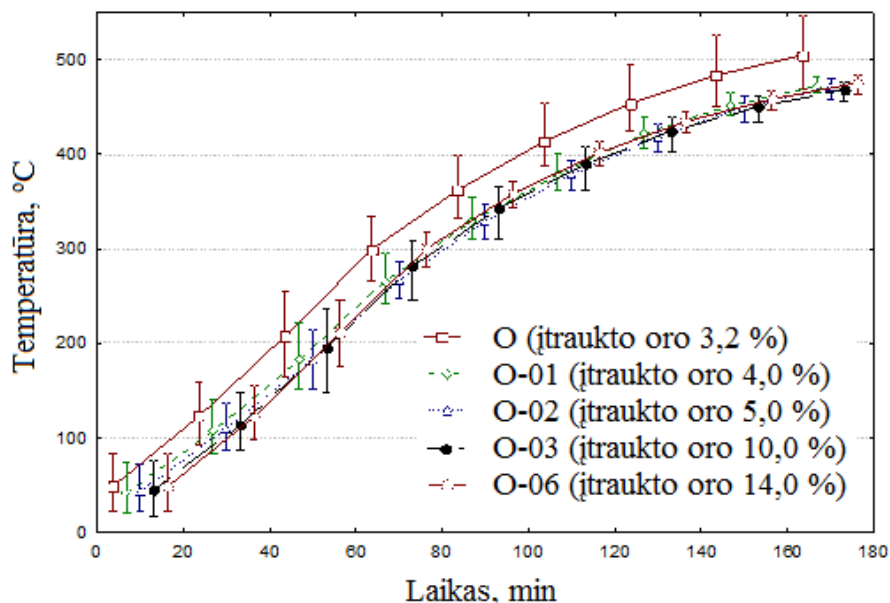


3.31 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais oro kiekiais 1 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiu būdu

Fig. 3.31. Temperature distribution in concrete samples with different amount of air 1 cm from the heated surface of the one side heating

Aukščiausia temperatūra po 3 valandų kaitinimo pasiekama betono bandinyje su 10 % oro kiekiu ir siekia 893 °C. Toliau išsidėsto bandiniai su 4 % ir 14 % oro kiekiu – 871 °C, su padidintu cemento kiekiu – 8,5 % ir 12 % oro kiekiu – 853 °C. Mažiausia temperatūra pasiekama su 5 % oro kiekiu ir siekia 820 °C.

Bandiniuose su skirtingu oro kiekiu nustatant temperatūros pasiskirstymą 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus (3.32 pav.) matomas beveik tiesinis temperatūros kitimas laiko bėgyje. Maksimalios temperatūros betonuose su orą įtraukiančia įmaiša ir oro kiekiu 4,0–14,0 % po 3 valandų kaitinimo išsidėsto mažame intervale nuo 470 °C iki 478 °C. Tuo tarpu betone be orą įtraukiančios įmaišos su 3,2 % oro kiekiu ši temperatūra yra didesnė ir siekia 505 °C temperatūrą.



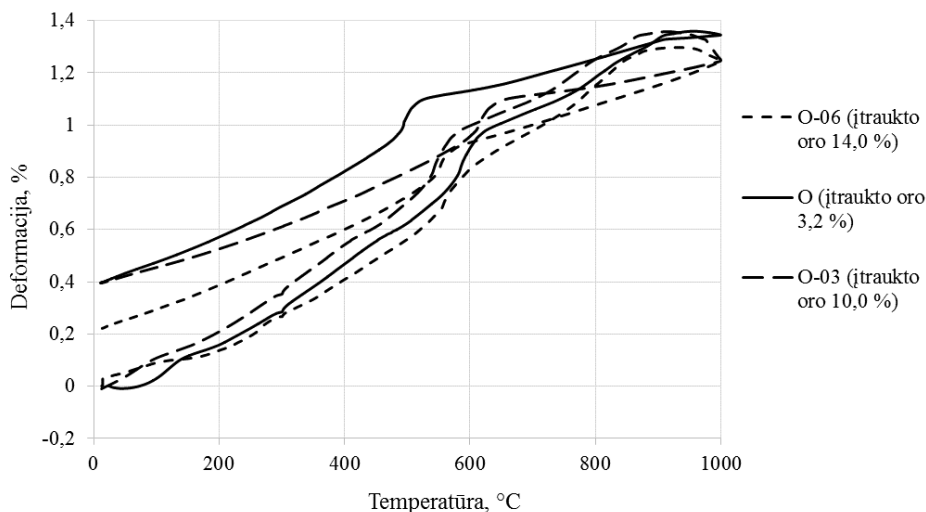
3.32 pav. Temperatūros pasiskirstymas betono bandiniuose su skirtingais oro kiekiais 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus kaitinant vienpusiai

Fig. 3.32. Temperature distribution in concrete samples with different amount of air 5 cm from the heated surface of the one side heating

Tyrimų rezultatai rodo, kad padidinus oro kiekį betone iki 4,0–5,0 % betono temperatūra po kaitinimo vidiniuose sluoksniuose gali būti sumažinta daugiau nei 30 °C.

3.3.2. Oro kiekio įtaka betono savybių pokyčiams veikiant aukštai temperatūrai

Betono su skirtingu oro kiekiu dilatimetrinės kreivės iki 1000 °C temperatūros pateiktos 3.33 paveiksle. Betono sudėtys pateiktos 2.10 lentelėje.



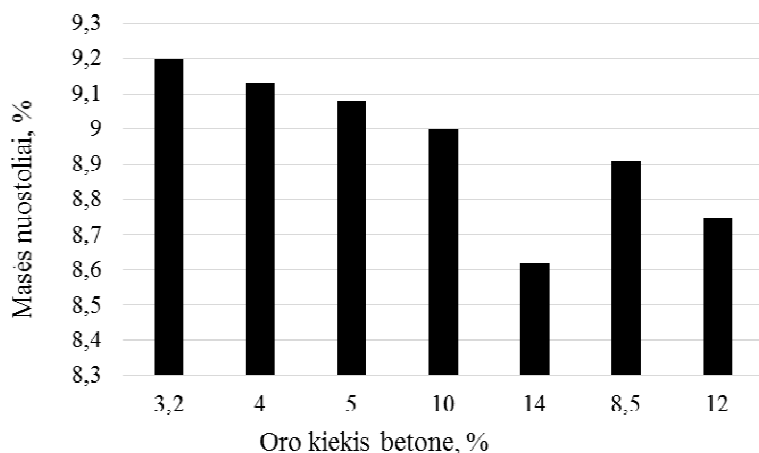
3.33 pav. Betono bandinių su skirtingais oro kiekiais terminis išsiplėtimas ir susitraukimas

Fig. 3.33. Thermal expansion of concrete samples with different amount of air

3.33 paveiksle pateiktose dilatometrinėse kreivėse pastebėtas žymus bandinių tūrio padidėjimas prie 573 °C temperatūros, kuriame vyksta kvarco persikristalizavimo procesai. Didžiausias plėtimasis kaitinant užfiksuotas betono bandiniuose su mažiausiu oro kiekiu betone, t. y. 3,2 %, deformacija siekia 1,6 % ribą. Mažiausios deformacijos užfiksuotos su didžiausiu oro kiekiu betone ir siekia apie 1,3 % ribą. Vėstant bandiniui pastebima ta pati tendencija, su mažu oro kiekiu liekamoji deformacija yra 0,6 %, su didžiausiu oro kiekiu liekamoji deformacija siekia 0,2 %. Ši liekamoji deformacija yra du kartus mažesnė lyginant su kitais tirtais betonais. Betono deformacijų sumažėjimą kaitinant galima paaiškinti didesniu oro tūriu, kuris kompensuoja susidarančius vidinius įtempius.

Betono su skirtingais įtraukto oro kiekiais masės nuostoliai po 3 valandų kaitinimo pateikti 3.34 paveiksle. Betono sudėty pateiktos 2.10 lentelėje.

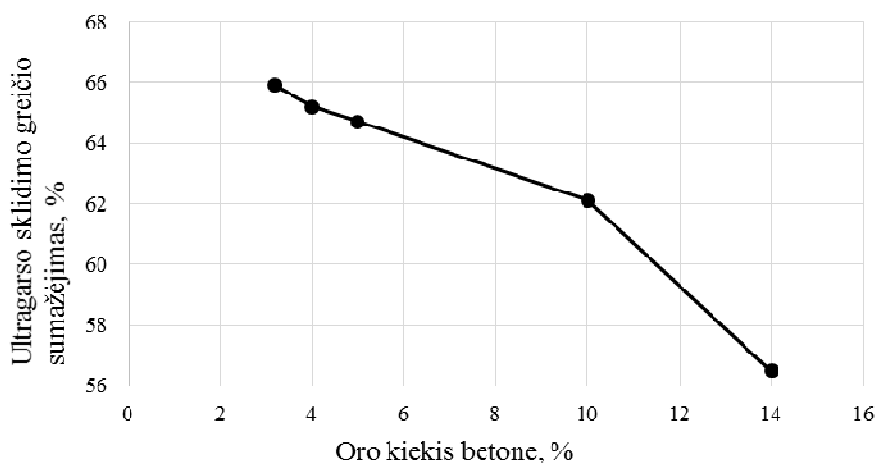
Iš 3.34 paveikslo matyti, kad betono masės nuostoliai nežymiai mažėja nuo 9,2 % iki 8,6 % didėjant oro kiekiui nuo 3,2 % (betonas be orą įtraukiančios įmaišos) iki 14 % (su 0,6 % orą įtraukiančios įmaišos). Gauti rezultatai rodo, kad oro kiekio didinimas betono mišinyje nežymiai sumažina masės nuostolius po kaitinimo.



3.34 pav. Betono bandinių su 17 % klinties priedo turinčiu cementu, dolomito užpildu ir su skirtingu oro kiekiu masės nuostoliai po trijų valandų kaitinimo vienu puse būdu

Fig. 3.34. Weight loss in concrete samples with 17% limestone additive, dolomite aggregate and different amounts of air after three hours of heating of the one side heating

Betono ultragarso sklaidimo greičio priklausomybė nuo įtraukto oro kiekio betone pateikta 3.35 paveiksle. Betono sudėtys pateiktos 2.10 lentelėje.



3.35 pav. Ultragarso sklaidimo greičio sumažėjimo priklausomybė nuo oro kiekio betone (17 % klinčių priedas, dolomito užpildas) po 3 val. kaitinimo vienu puse būdu

Fig. 3.35. Ultrasonic velocity decrease dependence of air volume in concrete (17% limestone additive, dolomite aggregate) after 3 h. of one side heating

Suformuotose betono bandiniuose su skirtingais oro kiekiais, ultragarsas greičiausiai sklinda betono bandinyje su 3,2 % oro kiekiu, o mažiausias ultragarso sklidimo greitis užfiksuotas su 14 % oro kiekiu betone. Tai gali būti paaiškinama per cementinį akmenį didesniu greičiu perduodamu ultragarso impulsu, negu per oro poras. Kuo didesnis cementinio akmens kiekis betone, tuo didesnis ultragarso sklidimo greitis. Paveikus betono bandinius su skirtingais oro kiekiais pagal standartinę gaisro kreivę gauti tokie rezultatai. Ultragarso greičio sumažėjimas betone tiesiškai mažėja didėjant įtraukto oro kiekiui. Jis siekia 65,9 %, kai oro kiekis 3,2 % ir 56,5 %, kai oro kiekis 14 %.

Betono su skirtingu oro kiekiu, bei padidintu cemento kiekiu mišiniuose gniuždymo stiprio rezultatai pateikti 3.8 lentelėje, gniuždymo stiprio sumažėjimo priklausomybė nuo įtraukto oro kiekio betone pateiktas 3.36 paveiksle.

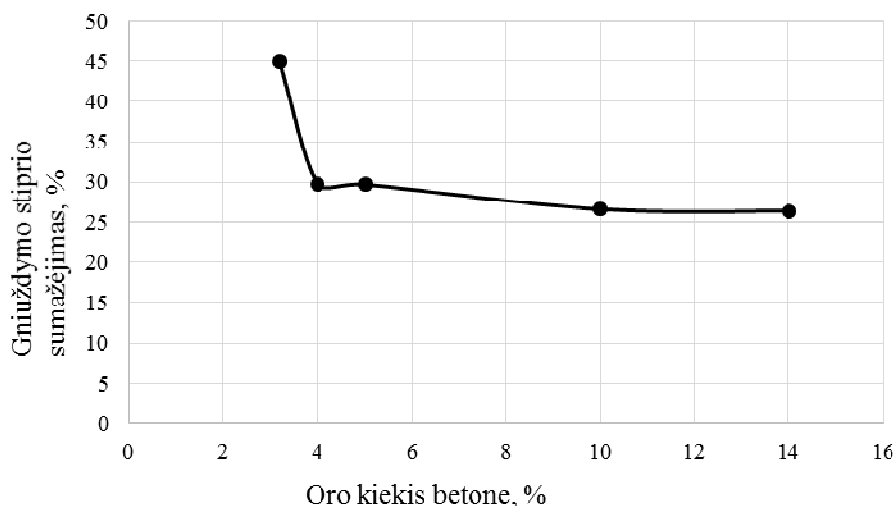
3.8 lentelė. Betono bandinių gniuždymo stipris su skirtingais oro kiekiais

Table 3.8. Compressive strength of concrete samples with different amount of air

Sudėties žymuo, %	Gniuždymo stipris prieš kaitinimą, MPa	Gniuždymo stipris po 3 val. kaitinimo, MPa
O (įtraukto oro 3,2 %)	58,8	32,4
O-01 (įtraukto oro 4,0 %)	57,3	40,2
O-02 (įtraukto oro 5,0 %)	52,5	36,9
O-03 (įtraukto oro 10,0 %)	38,3	28,1
O-06 (įtraukto oro 14,0 %)	32,9	24,2
O-03P (įtraukto oro 8,5 %)	62,8	43,7
O-06P (įtraukto oro 12,0 %)	55,1	31,7

Betono bandinių su skirtingais oro kiekiais gniuždymo stipris mažėja didėjant oro kiekiui betone, pagal žinomą priklausomybę, kad 1,0 % įtraukto oro sumažina betono gniuždymo stiprį 4–5 %. Padidinus cemento kiekį betono mišinyje su oro kiekiu 8,5 % ir 12,0 %, gaunamas panašus betono gniuždymo stipris, kaip ir su oro kiekiu 3,2 % ir 4,0 %.

Atlikus vienpusio kaitinimo bandymus gauname, kad didžiausias gniuždymo stiprio sumažėjimas įvyko su mažiausiu oro kiekiu ir siekia apie 45 %. (3.36 pav.) Padidinus oro kiekį betono mišinyje iki 4,0 %, gaunamas staigus gniuždymo stiprio sumažėjimo kritimas iki 30 %. Tolesnis oro kiekio didinimas betono mišinyje nežymiai mažina betono stiprio sumažėjimą ir nėra efektyvus. Padidinus oro kiekį betono mišinyje iki 14 %, galima gauti betono gniuždymo stiprio sumažėjimą lygų 26 %. Tyrimų rezultatai rodo, kad įtraukto oro kiekio padidinimas betono mišinyje panaudojant orą įtraukiančią įmaišą, leidžia efektyviai sumažinti destruktinius procesus suketėjusiam betone, vykstančius dėl aukštos temperatūros.



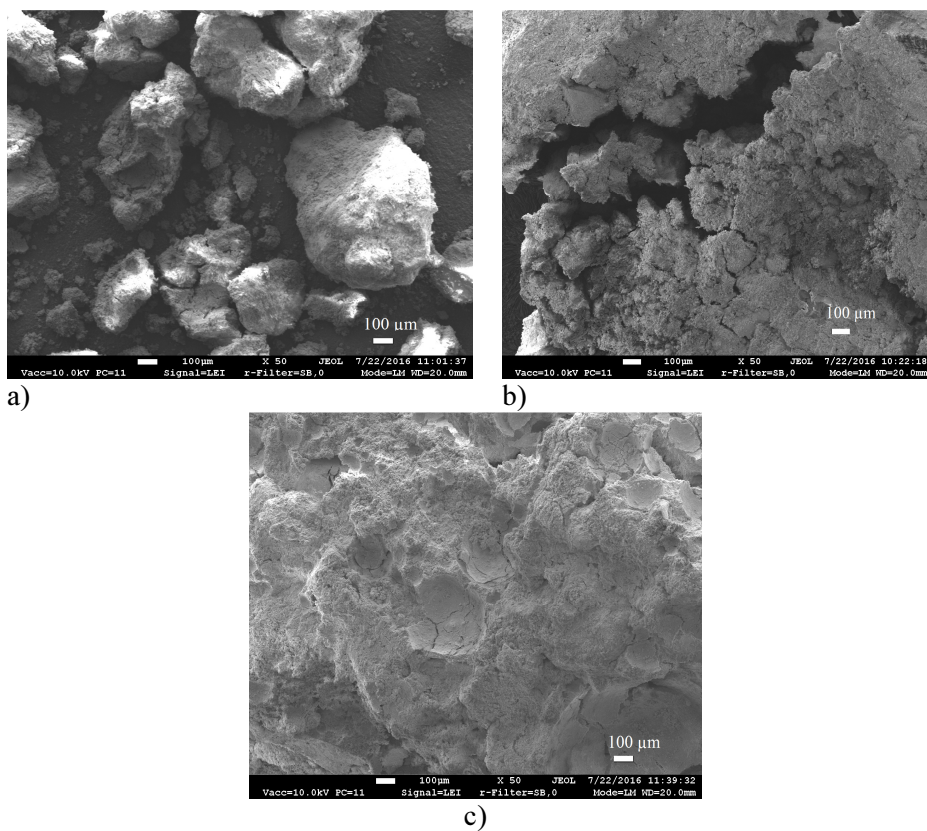
3.36pav. Betono bandinių (O, O-01, O-02, O-03, O-06) gniuždymo stiprio sumažėjimo priklausomybė nuo oro kiekio betone kaitinant vienpusiu būdu
Fig. 3.36. Concrete samples (O, O-01, O-02, O-03, O-06) compressive strength decrease dependence from different amount of air of the one side heating

Analogiškas įtraukto oro poveikis pastebimas ir betono irimo procesams dėl užšaldymo ir atšildymo poveikio drėgnoje būklėje, kurio metu taip pat susidaro vandens hidrostatinis slėgis kapiliarinėse porose cementiniame akmenyje. Efektyvus įtraukto oro kiekis betono atsparumo ugniai padidinimui yra 4,0–5,0 %.

3.3.3. Betono su skirtingu oro kiekiu mikrostruktūros pokyčiai veikiant aukštai temperatūrai

Siekiant įvertinti įtraukto oro kiekio įtaką betono atsparumui ugniai, buvo atlikta betono bandinių su skirtingu oro kiekiu mikrostruktūros analizė, naudojant skenuojančią elektroninę mikroskopiją. Paveiksluose 3.36–3.40 pateikiamas betono bandinių vaizdas su skirtingais oro kiekiais. Betono sudėtys pateiktos 2.10 lentelėje. Didinimas siekė nuo 50 iki 15000 kartų.

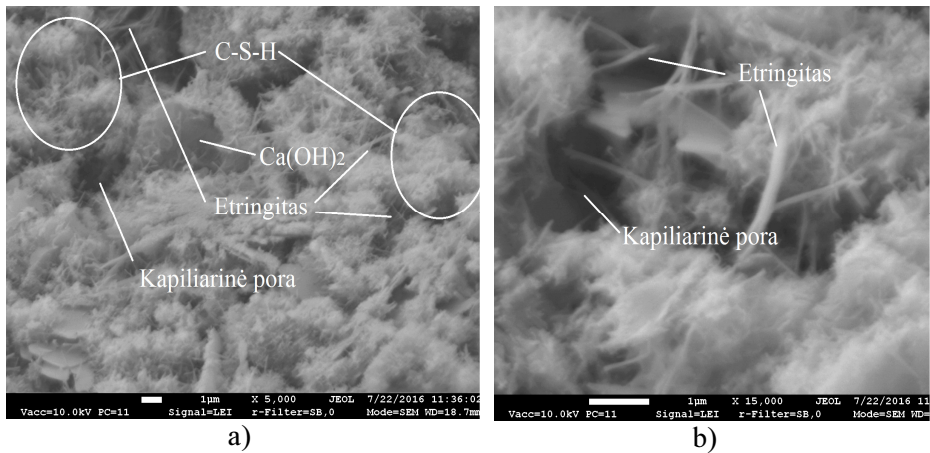
Iš 3.37 paveikslo matyti, kad bandinių, kuriuose nebuvo dėta orą įtraukiančios įmaišos (oro kiekis 3,2 %) po 3 val. kaitinimo atskiri cementinio akmens fragmentai pradėjo atskilinėti nuo bandinio paviršiaus. Bandinių, į kuriuos buvo įdėta 0,2 % orą įtraukiančios įmaišos (oro kiekis 5,0 %) paviršiuje atsirado platūs plyšiai, o bandinių su 14,0 % oro kiekiu paviršius liko mažiausiai pakitęs, su nedideliais pažeidimais, smulkiais plyšiais.



3.37 pav. Betono bandinių su skirtingu įtrauktu oro kiekiu kaitinto paviršiaus mikrostruktūra (50 kartų didinimas): a) O (įtraukto oro 3,2 %); b) O–02 (įtraukto oro 5,0 %); c) O–06 (įtraukto oro 14,0 %)

Fig. 3.37. Concrete specimens with entrained air of one side heating a refraction microstructure: a) O (3.2% entrained air); b) O–02 (5.0% entrained air); c) O–06 (14.0% entrained air)

Tokį efektą galima būtų paaiškinti tuo, kad vandens garai plito į oro poras, susidarė mažesnis slėgis ir mažesni vidiniai įtempimai. Cementinėje matricoje su mažesniu kiekiu oro porų vandens garai besiverždami iš vidinių sluoksnių ardė medžiagą ir sukėlė gilius įtrūkius arba cementinio akmenų fragmentų atskilinėjimą nuo paviršiaus. Buvo atlikta vidinių betono sluoksnių (5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus) mikrostruktūros analizė, kuri pateikta 3.38 paveiksle.

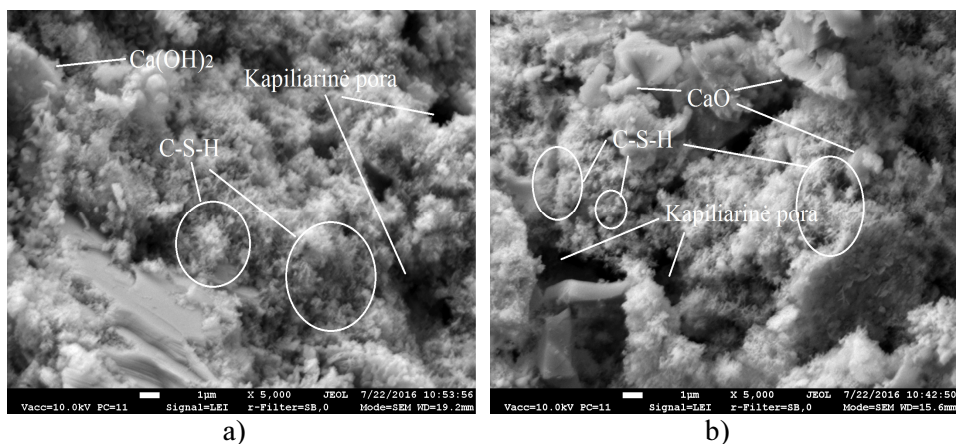


3.38 pav. Betono bandinių O (įtraukto oro 3,2 %) nekaitinto paviršiaus lūžio mikrostruktūra: (a) 5000 kartų didinimas (b) 15000 kartų didinimas
Fig. 3.38. Concrete samples O with (entrained air 3.2 %) refraction microstructure from not heated surface: a) 5000 magnification times (b) 15000 magnification times

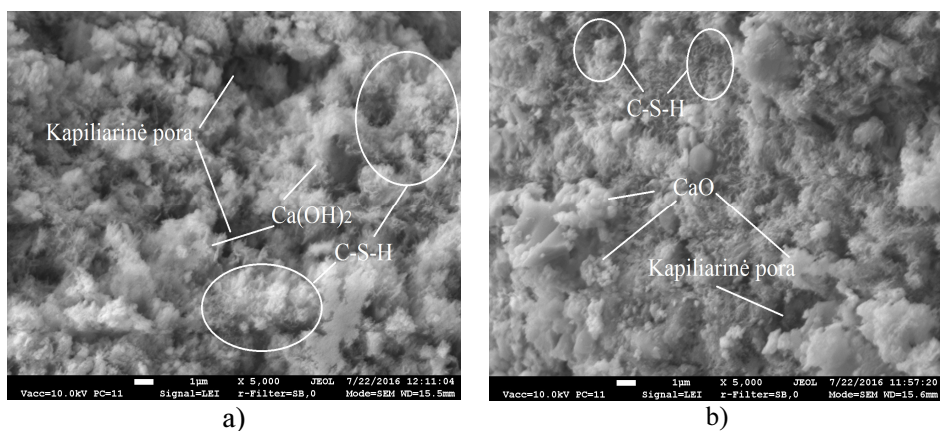
Betone be orą įtraukiančios įmaišos (3,2 % oro kiekis), mažai paveiktame aukštos temperatūros iki 200 °C nekaitintoje bandinio pusėje cementinio akmenų mikrostruktūroje galima išskirti eilinius cemento hidratacijos produktus: kalcio hidrosilikatų smulkių plaušelių sankaupas, stambias kalcio hidroksido heksagonalines plokšteles, lazdelių formos etringito kristalus bei hidratacijos produktais neužpildytas kapiliarines poras (3.38 pav. a ir b). Šie hidratacijos produktai turi klasikinę morfologiją tai rodo, kad jų nepakeitė minėtas temperatūrinis poveikis.

Betono su padidintu oro kiekiu iki 5,0 % temperatūros nepaveiktos pusės ir aukštos temperatūros paveiktos centrinės dalies mikrostruktūros nuotraukos pateikiamos 3.39 pav.

Palyginus betono su 5 % oro kiekiu mikrostruktūrą atskirų zonų paveiktos nedidelė iki 200 °C temperatūra ir aukštos temperatūros iki 500–600 °C, matome, kad tiek vienoje tiek kitoje zonoje pranyksta etringito kristalai, tačiau išlieka nepakitusios kalcio silikatų smulkių plaušelių sankaupos. Žemos temperatūros paveiktoje zonoje, matomos heksagonalinės kalcio hidroksido plokštelės, kurių nėra aukštos temperatūros zonoje. Aukštos temperatūros zonoje atsiranda neapibrėžtos formos kristalai, kuriuos galima priskirti kalcio oksidui (CaO).



3.39 pav. Betono bandinių O-02 (įtraukto oro 5,0 %) lūžio mikrostruktūra (5000 kartų didinimas): a) nekaitinto paviršiaus; b) bandinio centro
Fig. 3.39. Concrete samples O-02 (entrained air 5.0 %) refraction microstructure (5000 magnification times): a) from not heated surface; b) sample center

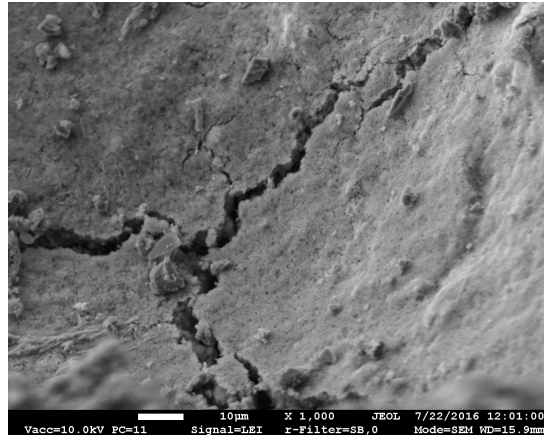


3.40 pav. Betono bandinių O-06 (įtraukto oro 14,0 %) lūžio mikrostruktūra (5000 katų didinimas): a) nekaitinto paviršiaus; b) bandinio centro
Fig. 3.40. Concrete samples O-06 (entrained air 14.0 %) refraction microstructure, 5000 magnification times: a) from not heated surface b) samples center

Palyginus betono su 14 % oro kiekiu mikrostruktūros vaizdą aukštos temperatūros zonoje (500–600 °C) ir žemesnės temperatūros zonoje (200 °C) išnyksta entringito kristalai. Kalcio hidroksido heksagonalinės plokštėlės matomos žemos temperatūros paveiktoje zonoje, tačiau jų nėra aukštos temperatūros

zonoje. Vietoje kalcio hidroksido plokštelių auštos temperatūros zonoje matomi neaiškios formos kristalai kuriuos galime priskirti kalcio oksidui.

Po aukštos temperatūros poveikio, betono bandinių centre (500–600 °C) susidaro didelis kiekis mikro plyšių (3.4 pav), kietoje fazėje, kurie žymiai sumažina cementinio akmens stiprumą.



3.41 pav. Betono bandinių mikro plyšių vaizdas bandinio centre (1000 kartų didinimas)

Fig. 3.41. Concrete samples micro-cracks image in the center of the sample (1000 magnification times)

3.3.4. Temperatūrinio režimo betone gaisro metu prognozavimas

Iš eksperimentų metu gautų temperatūrinių kreivių galima tiksliai prognozuoti susidarančias temperatūras skirtinguose betono su klinties portlandcemenčiu ir dolomito užpildu sluoksniuose nuo kaitinamo paviršiaus po skirtingos laiko trukmės. Prognozavimas atliktas veikiant betono paviršių temperatūra, kuri kinta pagal standartinę gaisro kreivę, kaitinant vienpusiai. Taip yra modeliuojamas temperatūros poveikis (analogiškas gaisrui) atitvarinėms konstrukcijoms, kai liepsna ir karštis veikia iš vienos pusės. Naudojant programinę įrangą statistiniams skaičiavimams nustatyta, kad minėtas kreives galima gana tiksliai (koreliacijos koeficientas 0,97) aprašyti polinominėmis funkcijomis, kurios pateiktos 3.9 lentelėje. Atlikus regresinę analizę buvo sudarytos empirinės lygtys (3.8 lentelė), pagal kurias galima prognozuoti betono temperatūrą (T , °C) po pasirinkto kaitinimo laiko (τ , min) ir pasirinktu atstumu nuo kaitinimo paviršiaus (a , cm). Lygčių koreliacijos ir determinacijos koeficientai pateikiami 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Temperatūros betone gaisro metu, kaitinant vienpusiai prognozavimo empirinės lygtys

Table 3.9. Empirical formula to temperature prediction in fire of concrete from the one side heating

Sudėties žymuo	Empirinė lygtis	Koreliacijos koeficientas	Determinacijos koeficientas
O (įtraukto oro 3,2 %)	$T=439,1+8,323 \tau-0,025 \tau^2-226,03a+24,72a^2-0,142 \tau a$	0,976	0,952
O-01 (įtraukto oro 4,0 %)	$T=448.5+8,365 \tau-0,025 \tau^2-245.1a+27.77a^2-0,190 \tau a$	0,974	0,948
O-02 (įtraukto oro 5,0 %)	$T=425,3+8,015 \tau-0,023 \tau^2-229,1a+25,89a^2-0,183 \tau a$	0,974	0,948
O-03 (įtraukto oro 10,0 %)	$T=441,2+8,533 \tau-0,026 \tau^2-223,6a+23,66a^2-0,201 \tau a$	0,977	0,955
O-06 (įtraukto oro 14,0 %)	$T=436,63+8,554 \tau-0,027 \tau^2-214,6a+22,34a^2-0,181 \tau a$	0,976	0,953
O-03P (įtraukto oro 8,5 %)	$T=424,4+8,196 \tau-0,024 \tau^2-223,3a+24,78a^2-0,203 \tau a$	0,976	0,952
O-06P (įtraukto oro 12,0 %)	$T=434,5+8,228 \tau-0,024 \tau^2-230,2a+25,62a^2-0,204 \tau a$	0,976	0,952

Kadangi lygčių koeficientai mažai skiriasi buvo sudarytos apibendrintos lygtys betonui be orą įtraukiančios įmaišos (3.1) ir su orą įtraukiančia įmaiša (3.2):

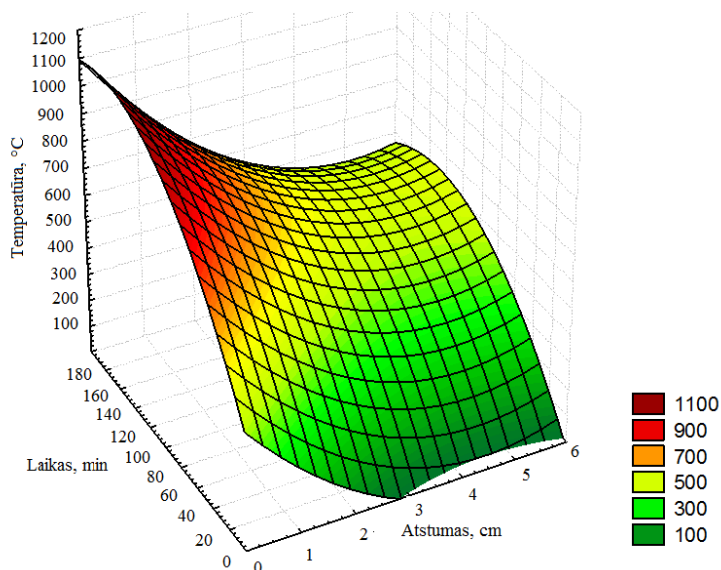
$$T=439+8,3 \tau-0,025 \tau^2-226a+25a^2-0,14 \tau a; \quad (3.1)$$

$$T=435+8,3 \tau-0,025 \tau^2-227a+25a^2-0,19 \tau a. \quad (3.2)$$

3.1 lygtis naudojama, kai betone nebuvo dėta orą įtraukiančios įmaišos, 3.2 lygtis naudojama, kai į mišinį dedama orą įtraukianti įmaiša.

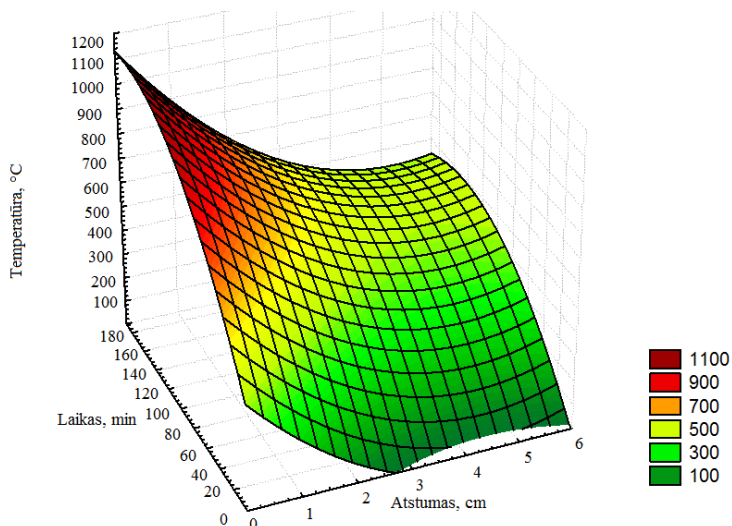
Polinominė priklausomybė pagal 3.1–3.2 empirines lygtis pateikta 3.42–3.43 paveiksle. Kadangi plieno kritinė temperatūra gaisro metu yra 500 °C, svarbu, kad gaisro metu betono sluoksnis, kuriame yra armatūra, nepasiektų kuo ilgiau šios kritinės temperatūros.

3.42 paveiksle pateiktą priklausomybę galima naudoti betonui be oro įtraukiančios įmaišos. 3.43 paveiksle pateiktą priklausomybę galima panaudoti betonui su orą įtraukiančia įmaiša, kai betone yra oro kiekis didesnis už 4,0 %.



3.42 pav. Temperatūros priklausomybė nuo laiko ir atstumo nuo bandinio paviršiaus, kaitinant vienpusiai, pagal 3.1 empirinę lygtį

Fig. 3.42. The temperature dependence on time and distance from the surface in accordance with 3.1 empirical formula from the one side heating



3.43 pav. Temperatūros priklausomybė nuo laiko ir atstumo nuo bandinio paviršiaus, kaitinant vienpusiai, pagal 3.2 empirinę lygtį

Fig. 3.43. The temperature dependence on time and distance from the surface of the test in accordance with 3.2 empirical formula from the one side heating

Iš tyrimų rezultatų matyti, kad gautas betonas 5 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus po 180 min nepasiekė kritinės 500 °C temperatūros, kai įtraukto oro kiekis betone buvo didesnis už 4,0 %, 3 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus minėta temperatūra nepasiekama po 100 min, o 2 cm atstume – po 60 min.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Vienpusiu kaitinimo metodu tiriant temperatūrų pasiskirstymą betono bandiniuose su skirtingais cementais 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus, nustatyta aukščiausia temperatūra su smulkiai maltu cementu (CEM I 42,5R) – ji siekia 613 °C, o mažiausia 589 °C temperatūra užfiksuota su cementu neturinčiu mineralinių priedų (CEM I 42,5N) ir 17 % klinties turinčiu cementu (CEM II A-LL 42,5 N).
2. Betone su šlakiniu cementu, kuriame yra 70 % aukštakrosnių šlako, kaitinimo metu dėl intensyvių adsorbuoto vandens garavimo pasireiškia sprogs-tamoji irtis, todėl šis cementas nerekomenduojamas betonui, kuriam keliami padidinti atsparumo ugniai reikalavimai.
3. Vertinant betonų su skirtingais cementais masės nuostolius ir ultragarso sklaidimo greičio pokyčius po vienpusio terminio poveikio žymių skirtumų nenustatyta, tačiau betono gniuždymo stiprio sumažėjimas po vienpusio terminio poveikio su 17 % klinties priedo turinčiu cementu yra žymiai mažesnis ir sudaro 12,5 %, tuo tarpu su kitais cementais jis siekia 27,0–30,5 %.
4. Įvertinus termogravimetrinių tyrimų rezultatus, galima išskirti penkis cementinio akmens kitimo etapus, kurie gali sukelti destruktinius procesus veikiant aukštai temperatūrai: 100–130 °C temperatūroje laisvo ir adsorbuoto vandens pasišalinimas, 140–170 °C temperatūroje hidroaluminatų irimas, 430–470 °C temperatūroje kalcio hidrosilikatų dehidratacija, 600–670 °C kalcio hidroksido dehidratacija, 670–730 °C temperatūroje kalcio karbonatų disociacija. Šiems procesams turi įtakos cemento mineralinė sudėtis ir cemente esantys mineraliniai priedai.
5. Dilatimetriniai betono tyrimai rodo, kad didinant temperatūrą iki 1000 °C cementinis akmuo su skirtingais mineraliniais priedais plečiasi iki 0,2–0,4 %, aušinant cementinis akmuo traukiasi nuo –0,4 iki –0,9 %. Bendra cementinio akmens deformacija su šlakiniu cementu siekia apie 1 %, o su cementu be priedų ir cementu su klinčių priedu yra apie du kartus mažesnė, dėl susidarancio mažesnio skystosios fazės kiekio aukštoje temperatūroje.
6. Temperatūros betone su skirtingais užpildais kaitinant vienpusiu metodu 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus po 3 valandų kaitinimo pagal standartinę gaisro kreivę pasiekia tokias ribas: su cementu neturinčiu priedų bei

žvirgždo užpildu 551 °C, su granito užpildu 560 °C, su keramzito užpildu 540 °C, su dolomito užpildu 531 °C, su cementu turinčiu 17 % klinties priedo bei žvirgždo užpildu 530 °C, su granito užpildu 567 °C, su keramzito užpildu 565 °C, su dolomito užpildu 509 °C. Betonuose su dolomito užpildu ir su cementu be priedų bei cementu su 17 % klinties priedu gaunama mažiausia temperatūra 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus.

7. Įvertinus vienpusį ir tūrinio bandymų metodus, kaitinant betono bandinius pagal standartinę gaisro kreivę, nustatyta, kad statinio konstrukcijos gaisro metu gali būti veikiamos vienpusiu ir tūriniu būdu, priklausomai nuo konstrukcijos paskirties ir padėties gaisro metu, todėl šie skirtingi betono atsparumo ugniai bandymo metodai gali būti taikomi įvairioms statinio konstrukcijoms, atsižvelgiant į jų panaudojimą.
8. Termogravimetrijos tyrimai iki 1000 °C temperatūros rodo, kad dažniausiai naudojamuose užpilduose (smėlis, žvirgždas, dolomitas) skyla kalcio ir magnio karbonatai, užfiksuotos skilimo temperatūros ribos yra nuo 650 °C iki 800 °C. Užpilduose neturinčiuose karbonatinių uolienu (granitas, keramzitas) jokie pokyčiai termogramose neužfiksuoti.
9. Dilatometriniai betono su skirtingais užpildais tyrimai rodo plėtimosi bei susitraukimo deformacijas prie 573 °C, kuri charakterizuoja kvarco kristalinės gardelės pokyčius. Liekamoji betono su skirtingais užpildais deformacijos kaitinant iki 1000 °C temperatūros mažiausios su keramzito užpildu (0,2 %) ir su dolomito užpildu (0,4 %), didžiausios deformacijos su žvirgždo užpildu (1,0 %) ir su granito užpildu (0,8 %). Didžiąją tūrio dalį betone sudaro užpildas, todėl užpildo deformacijos veikiant aukštai temperatūrai turi didelę įtaką betono atsparumui ugniai.
10. Betono su skirtingais užpildais gniuždymo stiprio sumažėjimas po aukštos temperatūros poveikio kaitinant vienpusiu būdu priklauso nuo užpildo ir svyruoja 43–49 % ribose, išskyrus keramzito užpildą (lengvajam betonui), kai betono gniuždymo stiprio pokytis po kaitinimo yra žymiai mažesnis ir siekia 25–26 %.
11. Didėjant įtraukto oro kiekiui betone, mažėja masės nuostoliai, ultragarso greičio pokytis, gaunamos žemesnės perkaitimo temperatūrų vertės ir mažesni betono stiprio sumažėjimai po temperatūrinio poveikio pagal standartinę gaisro kreivę atliekant bandymus vienpusiu kaitinimo metodu. Esant 5 % įtraukto oro kiekiui betone (su 0,2 % orą įtraukiančios įmaišos) jo gniuždymo stipris po 3 valandų kaitinimo sumažėja 29,7 %, kai tuo tarpu esant oro kiekiui 3,2 % (be orą įtraukiančios įmaišos) gniuždymo stipris sumažėja 44,9 %. Šie gauti skirtumai gali būti aiškinami betono poringumo pokyčiais. Betone esančios uždaros oro poros leidžia plėstis kaitinimo metu susidariusiems vandens garams ir taip sumažina vidinius įtempius cementi-

niame akmenyje. Tačiau įtraukto oro kiekis virš 5 % neturi didelės įtakos betono stiprumo sumažėjimui po vienpusio terminio poveikio.

12. Naudojant orą įtraukiančias įmaišas galima gaminti padidinto atsparumo ugniai cementinius betonų, kurių apsauginio sluoksnio storis priklauso nuo norimos gauti atsparumo ugniai klasės ir gali būti parinktas pagal autoriaus nustatytas grafines priklausomybes.

Bendrosios išvados

1. Temperatūriniam poveikiui atspariam betonui gaminti labiausiai tinka cementas su klinties priedu (CEM II A-LL tipo). Betonų su skirtingais cementais temperatūrinių laukų matavimai 5 cm atstumu nuo kaitinamo paviršiaus po 3 valandų poveikio pagal standartinę gaisro kreivę kaitinant vienpusiu būdu rodo, kad su cementu su klinties priedu pasiekama žemiausia temperatūra (apie 24 °C) ir mažiausias gniuždymo stiprio praradimas, kuris siekia 12,5 % lyginant su kitais tirtais cementais, kurie praranda 27,0–30,5 % gniuždymo stiprio. Tai galima paaiškinti mažesniu adsorbuotu vandens kiekiu tokiam cementiniame akmenyje bei karbonatinio priedo irimu aukštesnėse temperatūrose.
2. Keramzito užpildas turi pranašumą atsparumo ugniai požiūriu lyginant su kitais užpildais. Betono su šiuo užpildu gniuždymo stipris sumažėja apie 25–26 %, tuo tarpu betono su kitais užpildais – 43–49 %. Tai aiškinama mažesnėmis betono su tokiu užpildu terminėmis deformacijomis. Atlikus temperatūrų pasiskirstymo tyrimus su skirtingais betono užpildais pagal standartinę gaisro kreivę kaitinant vienpusiai gauta, kad 5 cm atstumu pasiekama mažiausia temperatūra su dolomito užpildu 531 °C (su cementu, neturinčiu mineralinio priedo), 509 °C (su cementu, turinčiu klinties priedą).
3. Padidinus oro kiekį betono mišinyje iki 4–5 % žymiai sumažėja betono gniuždymo stiprio nuostoliai po terminio poveikio – nuo 44,9 %, kai oro

kiekis lygus 3,2 % (betonas be orą įtraukiančios įmaišos) iki 29,8 %, kai oro kiekis 4,0 %; 29,7 %, kai oro kiekis 5 %; 26,6 %, kai oro kiekis 10 %; 26,4 %, kai oro kiekis 14 %. Temperatūrinių laukų tyrimai rodo, kad 5 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus betone su 5 % įtraukto oro kiekiu temperatūra yra apie 31 °C žemesnė negu temperatūra betone be orą įtraukiančios įmaišos. Gauti rezultatai aiškinami dideliu betono uždaru poringumu, kuris kompensuoja susidarančius vidinius įtempius bei vandens garų slėgį terminio poveikio metu.

4. Geriausi rezultatai betono atsparumo ugniai požiūriu pasiekti su cementu, turinčiu klinties priedo, dolomito stambiuoju užpildu ir 5 % įtraukto oro kiekiu. Po temperatūrinio poveikio pagal standartinę gaisro kreivę veikiant vienpusiai, toks betonas po 3 valandų kaitinimo praranda 29,7 % gniuždymo stiprio. Betono temperatūros vertė 5 cm atstume nuo kaitinamo paviršiaus nesiekia 480 °C temperatūros. Padidinus įtraukto oro kiekį iki 5 % galima gaminti gelžbetonines konstrukcijas su 5 cm apsauginiu betono sluoksniu, kurių atsparumas ugniai siektų REI 180.
5. Išvestos empirinės temperatūros pasiskirstymo betone lygtys kaitinant vienpusiai leidžia prognozuoti temperatūrinį režimą betono apsauginiame sluoksnyje gaisro metu ir gali būti naudojamos tiksliau įvertinti reikiamam jo storiui iki armatūros gelžbetoninėse konstrukcijose.

Literatūra ir šaltiniai

Anderberg, Y. Spalling phenomena of HPC and OC, *Proceedings of the International workshop on fire performance of high-strength concrete*, NIST, Gaithersburg, USA, 1997. 180 p

Antonovič, V. 1999. *Natrio silikato ir jo tirpalo įtaka kaitrai atsparaus betono savybėms*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius.

Arioz, O. 2007. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal* 42: 516–522.

Balandis A.; Kaminskas R.; Vaickelionis G. 2004 Statybinių medžiagų chemija II dalis Neorganinių rišamųjų medžiagų chemija Kaunas: Technologija. 86 p.

Bamonte, P.; Lo Monte, F. 2015 Reinforced concrete columns exposed to standard fire: Comparison among different constitutive models for concrete at high temperature. *Fire Safety Journal* 71: 310–323.

Bilodeau, A.; Malhotra, V. M. 2000. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. *ACI Material Journal*. 97 (1), 41–48.

Bilodeau, A.; Kodur, V.K.R.; Hoff, G.C. 2004 Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire, *Cement Concrete Composition* 26 (2): 163–174.

Bo Wu; Wei Xiong; Bo Wen. 2014 Thermal fields of cracked concrete members in fire. *Fire Safety Journal* 66: 15–24.

Bosiljkov, V.B. 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement Concrete Research* 33: 1279–1286.

Boulder Canyon Project Report 1995. Thermal properties of concrete. *Final Report by USBR*, Bulletin No. 1, Part VII, 1940. India: 162–6.

Carmen I.; Jose V.; Aguado S.; Manuel L.; Romero, Espinos A.; Hospitaler A.; 2015. Fire design method for concrete filled tubular columns based on equivalent concrete core cross-section. *Fire Safety Journal* 78: 10–23.

Castellote, M.; Alonso, C.; Andrade, C.; Turrillas, X.; Campo, J. 2004. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research* 34: 1633–1644.

Chan, S.Y.N.; Peng, G. F.; Anson, M 1996. Comparison between high-strength concrete and normal-strength concrete subjected to high temperature, *Material Structure*. 29 (1): 616–619.

Chotard, T.; Gimet-Breart, N.; Smith, A. 2001. Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminat cement at the early age. *Cement and Concrete Research Journal* 30: 405–412.

Čekanavičius, V.; Murauskas, G. *Statistika ir jos taikymai*. 2 d. Vilnius: TEV, 2004, 272 p.

Debicki, G.; Haniche, R.; Delhomme, F. (2012). An experimental method for assessing the spalling sensitivity of concrete mixture submitted to high temperature. *Cement and Concrete Composites* 30: 112–121

Deltuva, J.; Gailius, A.; Gumuliauskas, A.; Kulikauskas, L.; Malakuskas, M.; Martynaitis, M. 1982 *Statybinės medžiagos*. Vadovėlis. Vilnius: Mokslo. 348 p.

Demirel, B.; Kelestemur, O. 2010. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal* 45: 385–391.

Drysdale, D. 1998. *An introduction to fire dynamics*. Second Edition. John and sons, 447 p.

Eisinas, A.; Baltakys, K. 2009. Portlandito kiekio hidratuotame portlandcementyje nustatymas viena laikės terminės analizės metodu, *Cheminė technologija* 1: 1392–1231.

El-Dieb, A. S. 2009. Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers. *Material Design* 30 (10): 4286–4292.

Elzbutas H. *Statybinių medžiagų savybių ir struktūros ypatybių tyrimo metodai*. Kaunas: VITAE LITERA. 2007. 147 p.

Erline, B.; Hime, W. G.; Kueneeing, W.H. 1972 Evaluating fire damage to concrete structures, *Concreat Construction*. 154–159.

Garboczi, E. J.; Bentz, D. P. 1996. Modelling of the microstructure and transport properties of concrete. *Construction Building Material*. 10: 293–300.

Gawin, D.; Pesavento, F.; Schrefler, B.A. 2003 Modelling of hygro–thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo–chemical and mechanical material degradation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 192: 1731–1771.

Gawin, D.; Pesavento, F.; Schrefler, B.A. 2004 Modelling of deformations of highstrength concrete at elevated temperatures, *Concreat* 37 (268): 218–236.

Gawin, D.; Pesavento, F.; Schrefler, B.A. 2006 Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi–phase porous media model of concrete, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195: 5707–5729.

Goberis, S.; Antonovič, V. 2007. Kaitrai atsparūs šamotbetoniai Vilnius, Technika. 360 p. ISBN 978–9955–28–210–5.

Gribniak, V.; Bačinskas, D.; Kaklauskas, G. 2006. Gaisro temperatūra veikiamų laikančiųjų gelžbetoninių tunelio elementų elgsenos skaitinio modeliavimo strategija, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 1(1): 5–9.

Handoo, S. K.; Agarwal, S.; Agarwal, S.K. 2002 Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* 32: 1009–1018.

Heinz, D.; Gobel, M.; Hilbig, H. et al., 2010 Effect of TEA on fly ash solubility and early age strength of motor, *Cement Concrete. Research* 40: 392–397.

Hertz, K. D. 2003 Limits of spalling of fireexposed concrete, *Fire Safety Journal*, 38: 103–116.

Hertz, K. D.; Sorensen, L.S. 2005 Test method for spalling of fire exposed concrete, *Fire Safety Journal*, 40: 466–476.

Heskestad, G.; Delichatsios, M.A. 1989. Short Communication. Update: The Initial Convective Flow in Fire, *Fire Safety Journal* 15:471–475.

Hojae Lee; Cho Jae–Leon; Yoon, Eui–Sik; Cho Myungsug; Kim Do–Gyeum 2016. Assessment of mass fraction and melting temperature for the application of limestone concrete and siliceous concrete to nuclear reactor basemat considering molten core – concrete interaction. *Nuclear Engineering and Technology* 48:448–456.

Hung, Y.; Wong, Y.; Poon, C.; Anson, M. 2001. Impact of high temperature on PFA concrete. *Cement and Concreate Research* 31: 1065–1073.

Jalal Mostafa; Fathib Mojtaba; Farzad Mohammad. 2013. Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials*. 61:11–27.

Jansen, D.; Goetz–Neunhoeffler, F.; Stabler, C.; Neuauer, J. A. 2011 Remastered external standard method applied to the quantification of early OPC hydration, *Cement and Concrete Research*. 41: 602–608.

Jonaitis, B.; Papinigis, V. 2005. Ilgalaikės apkrovos ir gaisro temperatūrų įtaka betono mechaninėms savybėms, *Journal of Civil Engineering and Management* 11(4): 283–288.

Jonaitis, B.; Papinigis, V. 2006 Naujas Europos sąjungos gaisro veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo metodika, *Technological and Economic Development of Economy* 12(2): 108–117.

Kalliopi, K. A. Pore structure of cement-based materials. Testing, interpretation and requirements. *Modern concrete technology series*. vol.12. 2006. p 1–33.

Khan, M.; Bhattacharjee, B. Relationship 1995 between thermal conductivities of aggregate and concrete. In: Reddy RR, editor. *Civil engineering materials and structures*. Osmania University Hyderabad, India: 162–169.

Khan, M. I. 2002. Factors acting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models School of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, *UK Building and Environment* 37: 607–614.

Khoshnazar, R.; Beaudoin, J. J., Alizadeh, R.; Raki, L. 2012 Volume stability of calcium sulfoaluminate phases. *The American Ceramic Society* 95: 3979–3984

Kimura, K.; Ozawa, M.; Rokugo, K.; Morimoto, H. 2008. Relationship between internal vapor pressure and explosive spalling of fiber reinforced concrete, *Proceedings of the Japan Concrete Institute* 30 (1): 339–344.

Kostrzanowska–Siedlarz, A.; Gołaszewski, J. 2015. Rheological properties and the air content in fresh concrete for self compacting high performance concrete of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials Engineering and Building Processes, Akademicka 5 Str., 44–100 Gliwice, *Poland Construction and Building Materials* 94: 555–564

Kumar, M.; Paulo, P.; Monteiro, J. M. 2005 Concrete Microstructure Properties, and Materials 3rd edition, *Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley*

Lietuvos TSR mineralinių žaliavų apžvalga. Ats. Redakt. V. Vonsavičius. II tomas, Vilnius, 1961 m, 415 psl.

LST EN 1992-2-1-2:2005 (Eurokodas 2–1-2:2005) „Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 13369 Benrosios surenkamų betoninių gaminių taisyklės. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 197-1:2011 Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 12620:2003+A1:2008 Betono užpildai. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 13043:2003 Keliams, skridimo aikštėms ir kitoms eismo zonoms naudojamų bituminių mišinių ir paviršiaus apdorojimo sluoksnio mineralinės medžiagos. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 1097-2+AC: 2003 Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 2 dalis. Atsparumo trupinimui nustatymo metodai. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 1097-3: 2002 Užpildų mechaninių ir fizikinių savybių nustatymo metodai. 3 dalis. Piltinio tankio ir tuštymėtumo nustatymas. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 1367-2:2010 Bandymai užpildų šiluminėms savybėms ir atsparumui atmosferos poveikiams nustatyti. 2 dalis. Magnio sulfato metodas. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 933-11:2009 Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granuliometrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 1097-1:2011 Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Atsparumo dėvėjimuisi nustatymas (Devalio metodas). Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 12350-2:2009 Betono mišinio bandymai. 2 dalis. Slankumo bandymas. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 12350-6:2009 Betono mišinio bandymai. 6 dalis. Tankis. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 12350-7:2009 Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 12390-3:2009 Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 12390-7:2009 Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis. Europos standartizacijos komitetas.

LST EN 1363-1:2012 Atsparumo ugniai bandymai. 1 dalis. Bendrieji reikalavimai Europos standartizacijos komitetas.

Lukošius, K. *Naujas vienpusis konstrukcijų kaitinimo metodas ir jo taikymas prognozuojant atitvarinių konstrukcijų atsparumą ugniai*. Daktaro disertacija. VGTU, Vilnius, 2004. 100 p.

Marshall, A. L. 1972 The thermal properties of concrete. *Building Science* 7(3):167–174.

- Martinėnas, B. 2004. Eksperimento duomenų statistinė analizė. Vilnius: Technika. 101 p.
- Martinez–Ramirez, S.; Palomo, A. 2001. Microstructure studies on portland cement pastes obtained in highly alkaline environments. *Cement and Concrete Research Journal* 31: 1581–1585.
- Matesova, D.; Keršner, Z. 2006 Effect of porosity and fracture toughness on explosive spalling of concrete. *Brittle Matrix Composites* 8: 581–588.
- Mendoza, O.; Tobón, J.I. 2013 An alternative thermal method for identification of pozzolanic activity in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /pozzolan pastes, *J. Thermal Analysis Calorimetric* 114: 589–596.
- Min Li, Chun Xiang Qian, Wei Sun. 2004 Mechanical properties of high–strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research* 34: 1001–1005.
- Mindeguia, J. G.; Pimienta, P.; Noumowé, A.; Kanema, M. 2010 Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature – Experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cement and Concrete Research* 40: 477– 487.
- Monteagudo, S. M.; Moragues, A.; Galvez, J. C.; Casati, M. J.; Reyes, E. 2014. The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. *Thermochimica Acta* 592: 37–51.
- Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Aggelakopoulou, E. 2004 Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis, *Thermochim Acta* 420: 135–140.
- Na–Hyun Yia,b, Seung–Jai Choia, Sang–Won Leea, Jang–Ho Jay Kim 2015. Failure behavior of unbonded bi–directional prestressed concrete panels under RABT fire loading. *Fire Safety Journal* 71: 123–133.
- Naujokaitis, A. 2006. Statybinės medžiagos užpildai, Vilniaus Gedimino technikos universitetas. 247 p.
- Naujokaitis, A. Statybinės medžiagos. Betonai. Vilnius. Technika. 2007. 355 p.
- Navickas, A. A.; Skripkiūnas, G.; Gečys, R. 2003. medžiagotyros ir statybinių medžiagų laboratoriniai darbai. Kaunas: Technologija, 109 psl.
- Pacewska, B.; Bukowska, M.; Wilinska, I.; Swat, M. 2002 Modification of the properties of concrete by a new pozzolan: a waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed, *Cement Concrete Research*. 32: 145–152.
- Phan, L. T.; Carino, J. N. 1998 Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature, *Journal of Materials in Civil Engineering, Americal Society of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 1: 58–64.

Pliya, P. 2011. Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. *Construction and Building Materials* 25: 1926–1934 p.

Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie Vidaus reikalų ministerijos direktoriaus įsakymas „Dėl gaisrinės saugos pagrindinių reikalavimų patvirtinimo 2010 m. gruodžio 7 d. Nr. 1–338.

Pundienė, I. 2000. *SiO₂ mikrodulkių įtaka mažacemenčių kaitrai atsparių betonų iš šamoto atliekų savybėms*. Daktaro disertacijos santrauka. Termoizoliacijos institutas: 16 p.

Rush, D.; Bisby, L.; Gillie, M.; Jowsey, A.; Lane, B. 2015. Furnace tests on unprotected and protected concrete filled structural hollow sections. *Fire Safety Journal* 78: 71–84

Sakalauskas, V. Statistika su Statistica. Vilnius: Margi raštai, 1998. 229 p.

Sandberg, F. Doncaster, 2004 On the mechanism of strength enhancement of cementpaste and mortar with triisopropanolamine, *Cement Concrete. Research*. 34: 973–976.

Sarvaranta, L.; Mikkola, E. 1994 Fibre mortar composites under fire conditions: effects of ageing and moisture content of specimens, *Material Structure*. 27: 532–538.

Schmitta, N.; Hernandez, J. F.; Lamoura, V.; Berthauda, Y.; Meunier, P.; Poirier, J. 2000. Coupling between kinetics of dehydration, physical and mechanical behaviour for high alumina castable. *Cement and Concrete Research Journal* 30: 1597–1607.

Shui, Z.; Xuan, D.; Chen, W.; Yu, R.; Zhang, R. 2009. Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials* 23: 531–537.

Sideris, K. K.; Manita, P.; Papageorgiou, A.; Chaniotakis, E. 2006 Mechanical characteristic of high performance fiber reinforced concretes at elevated temperatures, *ACI Special Publication* 212–60: 973–988.

Skripkiūnas, G. Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės. Vadovėlis. KTU. Vitae Litera. 2007. 344 p.

Soo-Ho Chang; Soon-Wook Choi; Junhwan Lee. 2016. Determination of the combined heat transfer coefficient to simulate the fire-induced damage of a concrete tunnel lining under a severe fire condition. *Tunnelling and Underground Space Technology* 54: 1–12.

Suhua Ma; Weifeng Li; Shenbiao Zhang; Yueyang Hu; Xiaodong Shen. 2015 Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine *Cement and Concrete Research* 67: 122–13.

Sun Bei; Lin Zhixiang. 2016. Investigation on spalling resistance of ultra-high-strength concrete under rapid heating and rapid cooling Case Studies in Construction Materials 4: 146–153.

Šiaučiūnas, R.; Baltakys, K.; Baltušnikas, A. Silikatinų medžiagų instrumentinė analizė. Vadovėlis. KTU. Vitae Litera. 2007. 244 p.

Vektaris, B.; Vilkas V. Betono tvarumas. Monografija. Technologija 2006. 162 p.

Velázquez, S.; Monzó, J.; Borrachero, M. V.; Soriano, L.; Payá, J. 2016 Evaluation of the pozzolanic activity of spent FCC catalyst/fly ash mixtures in Portland cement pastes. *Thermochimica Acta* 632: 29–36.

Vydra, V.; Vodak, F.; Kapičková, O.; Hoškova, Š. 2001. Effect of temperature on porosity of concrete for nuclear–safety structures, *Cement and Concrete Research Journal* 31:1023–1026.

Žurauskienė, R.; Naujokaitis, A. P.; Mačiulaitis, R. ir Žurauskas, R. 2012. Statybinės medžiagos. Vilnius: Technika. 540 p.

Weichung Yeh; Tun Chi Fu; Jiang Jhy Chang; Ran Huang. 2015 Properties of pervious concrete made with air–cooling electric arc furnace slag as aggregates Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung 202, *Taiwan Construction and Building Materials* 93: 737–745.

Xiao Jianzhuang; Zhiwei Li; Qinghai Xie; Luming Shen. 2016 Effect of strain rate on compressive behaviour of high–strength concrete after exposure to elevated temperatures, *Fire Safety Journal*. 83: 25–37

Xing, Z., Anne–Lise, B., Ronan, H., Noumowe, A., Ledesert, B. 2015. Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature *Construction and Building Materials* 95: 18–28.

Zoldners, N. G. 1971 Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures. *ACI Publication* SP–25: 1–31.

Бутт, Ю.; Сычев, М.; Тимашев, В. *Химическая технология вяжущих материалов*. Москва: Высшая школа, 1980. 452 с.

Ильин, Н. А. *Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции*. Москва. 1979. 212 с.

Мачюлайтис, Р. Морозостойкость и долговечность изделий фасадной керамики. Монография. Вильнюс: Техника. 1997. 307 с.

Некрасов, К. *Жароупорный бетон*. Москва: Промстройиздат, 1957. 284 с.

Тейлор, Х. *Химия Цемента*. Москва: Мир, 1996. 215 с.

.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Jocius, V.; Skripkiūnas, G.; Lipinskas, D. 2013. Cement type influence on fire resistance of concrete, *International Review of Civil Engineering* 4(4): 162–167 (SCOPUS).

Jocius, V.; Skripkiūnas, G.; Lipinskas, D. 2014. Effect of aggregate on the fire resistance of concrete, *International Review of Civil Engineering* 5(4): 118–123 (SCOPUS).

Jocius, V.; Skripkiūnas, G. 2016. The mechanism of disintegration of cement concrete at high temperatures, *Construction Science*, 18: 4–9.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Various types of cement concrete that may vary in cement type, aggregates and chemical admixtures, can be used in the production of reinforced concrete structures. This affects the microstructure of concrete and processes taking place at high temperatures. Concrete structure peculiarities are important in assessing the fire resistance of concrete. Currently, when designing the fire resistance of reinforced concrete structures, characteristics of concrete used in the production of the structures, materials used in production and their composition, and especially the volume of entrained air, do not receive sufficient attention.

Fire resistance of reinforced concrete structures is determined according to the thickness of the protective layer of concrete to reinforcement; however, in order to avoid additional protective layers, in case of reinforced concrete structures that are subject to high fire resistance requirements (R 180 criterion) accurate assessment of distribution of temperature fields in the concrete cross-section and proper selection of materials used to produce such concrete and its composition is necessary.

This thesis analyses the influence of cements of different types, different aggregates and entrained air content on fire resistance of concrete.

The relevance of the thesis

One of the essential requirements that construction materials are subject to is fire resistance. In order to produce efficient reinforced concrete structures of high fire resistance, technical changes at high temperatures of concrete itself must be assessed. Raw materials for such concrete must be properly selected, quantities of components in concrete must be optimized and concrete structure resistant to high temperatures must be created optimizing concrete porosity. The results of the investigation can be applied to design fire resistant concrete structures and to produce cement concrete of increased fire resistance.

The object of the research

The object of thesis is fire resistance of concrete with various types of cement, which contain different mineral additives (blast furnace slag, limestone additives), different coarse aggregates (gravel, crushed granite, crushed dolomite, expanded clay aggregates) and different entrained air content in concrete mixture.

The aim of the thesis

To investigate the influence of mineral additives (blast furnace slag, limestone), different mineral composition aggregates and entrained air content in concrete mixture on fire resistance of concrete.

The objectives of the thesis

1. To determine temperature distribution in the cross-section of concrete containing different cements, aggregates and entrained air content affected by high temperatures according to the standard fire curve, and to describe it mathematically.
2. To examine temperature impacts and destruction processes on concrete containing different cements and aggregates.
3. To determine changes in the microstructure and physical mechanical properties of concrete with different entrained air content under the impact of high temperatures.
4. To determine recommended raw materials and entrained air content in concrete when designing concrete structures with increased fire resistance.

Research methodology

Standard methods for determining slump, density and entrained air content were used to assess technological characteristics of concrete mixtures. Methods of compressive strength and ultrasonic pulse velocity were used to examine hardened concrete. To examine the distribution of temperature fields of concrete, one-way and volumetric heating methods according to a standard fire curve were used. Methods of weight loss, thermogravimetric analysis,

infrared spectroscopy and dilatometry were used to examine the process of destruction of hardened cement paste, different aggregates and concrete. Changes in concrete microstructure were examined using a scanning electron microscopy.

The scientific novelty of the thesis

The following results important for material engineering science were obtained during investigation:

1. Temperature distribution patterns in cement concretes with different cements, aggregates and different entrained air content were determined with the temperature changing according to the standard fire curve.
2. The influence of entrained air content in concrete with air-entrained admixtures on concrete fire resistance and possibilities to use such concrete in increased fire resistance structures was determined.

The practical value of the research finding

Practical recommendations on cement type, aggregates and chemical admixtures selection for concrete were made for design of concrete with increased fire resistance.

The results can be used for the assessment of the concrete protective layer up to the reinforcement for the designed fire resistance of concrete structure considering according to mathematical equations determined by author.

The defended statements

1. Mineral additive in cement (blast furnace slag) affecting adsorbed water content in hardened cement paste, and changes in crystalline cell occurring in aggregates, causing deformation processes in concrete during heating, have negative influence on fire resistance of concrete.
2. Increased air content in concrete up to 5% compensates temperature deformations and the pressure caused by water vapour migration under the influence of high temperature in concrete, can be used for the increasing fire resistance of concrete.

The approval of the research findings

Three scientific publications on the topic of the dissertation were published reviewed foreign journal, two of which in publications registered in *Scopus* database. Results of the research conducted in the dissertation were presented in five scientific conferences held in Lithuania and abroad:

- Jocius V. 2011. Cement Concrete Decomposition Mechanism at High Temperatures, 14th conference of young scientists of Lithuania “Science – the future of Lithuania”.

- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2012. The Influence of Cement Type on Fire Resistance of Concrete. Republican conference “Materials Engineering 2012”.
- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2013. The Influence of Cement Type and Different Types of Aggregates on Fire Resistance of Concrete. 54th international scientific conference of Riga Technical University.
- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2013. The Influence of Cement Type and Fillers on Fire Resistance of Concrete. Republican conference “Materials Engineering 2013”.
- Jocius V., Skripkiūnas G., Lipinskas D. 2014. The Influence of Aggregates on Fire Resistance of Concrete. 55th international scientific conference of Riga Technical University.

The structure of the thesis

The dissertation consists of the introduction, three chapters, general conclusions, a list of references and publications of the author of the dissertation.

The paper comprises 103 pages, excluding summary in the English language and annexes; it contains 5 numbered formulas, 60 figures and 20 tables. 108 sources of literature were used when writing the dissertation.

Acknowledgements

I want to say sincerely thank to Warsaw University of Technology Branch in Plock Chemistry institute staff, lead by Prof. Habil. Dr. Barbara Pacewska for valuable advice and performed termogravimetric and infrared spectroscopy analysis research during the scientific traineeship.

1. Scientific research analysis of temperature influence on concrete components, structure and properties

Hardened cement paste is a porous body with colloidal dispersible microcrystal, which can bond a relatively large amount of water, comprising the greatest part of the solid phase thereof.

The hardening of Portland cement takes place in aqueous medium saturated with calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cement minerals forms new hydrated compounds with water. There are three main products that form at the time of cement hydration: calcium silicate hydrates (C–S–H); calcium hydroxide (CH); calcium sulphoaluminate – in trisulfate (AFt) or monosulfate (AFm) form.

Scientists distinguish four stages of formation of Portland cement:

1. Having gotten into the water, cement particles start to dissolve.
2. A layer of hydration products forms on the surface of coarse cement particles. The finest particles become cores of hydration products. Cement particles expand when

covered in hydrates, because the volume of hydrates is greater than the volume of cement powder.

3. Expansion results in smaller cores contacting with the surface of large particles, thus intervening and forming a cluster structure.

4. With further expansion, clusters contact in expanded places and stick together, forming a bridge structure.

Aggregate is an important component of concrete. Aggregate is an inert component of mixtures, which forms the major share of the mixture volume, up to 95%. The main purpose of aggregates is to fill up the volume in the mixture, reducing the volume of a binder and improving technical properties of concrete.

To improve concrete properties, various additives are mixed in the composition of concrete. The functioning of granulated slags in cement systems is the same as that of pozzolanic additives. However, slags differ from other pozzolana, because they can harden themselves. The main product of hydration of blast furnace slag mixed with Portland cement and water was determined to be essentially exactly the same as that of Portland cement.

When hardened Portland cement paste is exposed to high temperatures, Ca(OH)_2 calcium hydroxide, the size whereof is 10 nm, loses water when heated and converts to CaO crystal of typical size of 10^{-3} nm. The specific surface of calcium oxide is large, thus it is saturated from the environment and rehydrates. During the second hydration, the volume of Ca(OH)_2 increases by 44%. Such a phenomenon leads to complete decomposition of hardened cement paste.

When heating concrete, the explosive effect is possible. Scientists state that the explosive effect is possible at temperatures below 200 °C. Other authors name temperatures of 200–350 °C, say that the explosive effect is identified at this reference temperature value.

LST EN 13369:2013 standard “General rules of precast concrete products” establishes that fire resistance according to fire spread parameters may be evaluated in accordance with calculation methods or according to tests.

2. Materials used for testing and fire resistance testing methodologies

Portland cement with different mineral additives was used in the tests, including CEM I 42,5 R (without additives, finely ground), CEM I 42,5 N (without additives), CEM II/A-LL 42,5 N (17% limestone additive), CEM II/A-S 42,5 N (17 % blast furnace slag additive), CEM III/B 32,5 N (70 % blast furnace slag additive), manufacturer – AB Akmenės Cementas”. Chamotte “Grade-Bos 125” from the Polish company T-Ozmo. Operating temperature – 1250 °C, Al_2O_3 content – 29%. Sand, gravel, crushed granite, crushed dolomite and expanded clay aggregate was used in testing.

Concrete strength class is C35/45, which is suitable for producing load-bearing structures. S2.1 table presents composition and quantities of concrete mixture that were used to examine the influence of mineral additives. Tests were conducted with cement with no additives, with finely ground cement, cement with 17% limestone additive and 17% and 70% slag additive. Water and cement ratio equal 0.93.

Table S2.1. Concrete mixtures composition (quantities for 1 m³ of concrete) for testing the influence of mineral additives

Composition	Cement, kg					Chamotte (fr 0/4), kg	Plasticizer, kg	Water, kg
	CEM I N 42,5 N	CEM I R 42,5 R	CEM II A-LL 4,5 N	CEM II A-S 42,5N	CEM III /B 32,5N -LH			
C1N (without additives)	323	–	–	–	–	1896	6.4	300
C1R (finely ground)	–	323	–	–	–	1896	6.4	300
C2L (17 % limestone additive)	–	–	323	–	–	1896	6.4	300
C2S (17 % slag additive)	–	–	–	323	–	1896	6.4	300
C3 (70 % slag additive)	–	–	–	–	323	1896	6.4	300

S.2.2 table illustrates the composition of concrete mixture and quantities, which were used to investigate the influence of aggregates. The tests were conducted with gravel, crushed dolomite, crushed granite and expandet clay aggregates.

Table S2.2. Concrete mixtures composition (quantities for 1 m³ of concrete) for testing of the influence of aggregates

Composition	Cement, kg		Aggregate, kg						Plasticizer, kg	Water, kg
	CEM I N42,5 N	CEM II A-LL 42,5 N	Sand fr. 0/4	Gravel fr. 4/16	Crushed granite fr. 4/16	Crushed dolomite fr. 4/16	Expanded clay aggregate			
							fr. 4/8	fr. 4/8		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
UIŽ (gravel)	331	–	856	1020	–	–	–	–	3.31	149
UIG (granite)	331	–	856	–	1020	–	–	–	3.31	149
UID (dolomite)	331	–	856	–	–	1020	–	–	3.31	149

End of the Table S2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U1K (expanded clay)	331	–	856	–	–	–	92	112	3.31	149
U2Ž (gravel)	–	331	856	1020	–	–	–	–	3.31	149
U2G (granite)	–	331	856	–	1020	–	–	–	3.31	149
U2D (dolomite)	–	331	856	–	–	1020	–	–	3.31	149
U2K (expanded clay)	–	331	856	–	–	–	92	112	3.31	149

S2.3. table presents composition of concrete mixture and quantities that were used to test the influence the entrained air content on concrete fire resistance.

Table S2.3. Concrete mixtures composition (quantities for 1 m³ of concrete) for testing of the influence of entrained air content

Composition	Cement, kg	Aggregate, kg		Plasticizer, kg	Air-entraining admixture, %	Water, kg
	CEM II A-LL 42,5 N	Sand fr. 0/4	Crushed dolomite fr. 4/16			
O (entrained air content 3.2 %)	331	856	1020	3.31	0.0	149
O-01 (entrained air content 4.0 %)	331	856	1020	3.31	0.1	149
O-02 (entrained air content 5.0 %)	331	856	1020	3.31	0.2	149
O-03 (entrained air content 10.0 %)	331	856	1020	3.31	0.3	149
O-06 (entrained air content 14.0 %)	331	856	1020	3.31	0.6	149
O-03P (entrained air content 8.5 %)	460	856	1020	4.6	0.3	149
O-06P (entrained air content 12.0 %)	520	856	1020	5.2	0.6	149

100 mm × 100 mm × 100 mm concrete cubes were produced for the experiments. Slump of the concrete mixture was determined according to LST EN 12350-2, its density – according to LST EN 12350-6, and entrained air content in the mixture – according

to LST EN 12350-7. Before tests, concrete cubes were cured in water of 20 ± 2 °C for 28 days. 12 pcs. samples were made in each batch. Three samples from each batch were used to determine compressive strength after 28 days. Compressive strength of concrete was determined according to LST EN 12390-3. The density of hardened concrete was determined according to LST EN 12390-7 requirements.

Concrete cubes of different mixtures were formed for application of one-sided fire resistance testing method. Four edges of the cube were insulated in mineral wool and the other two were not insulated. One uninsulated edge of the cube was pressed to the furnace. Figure S2.1 illustrates the principal scheme of the evaluation methodology of one-side heating.

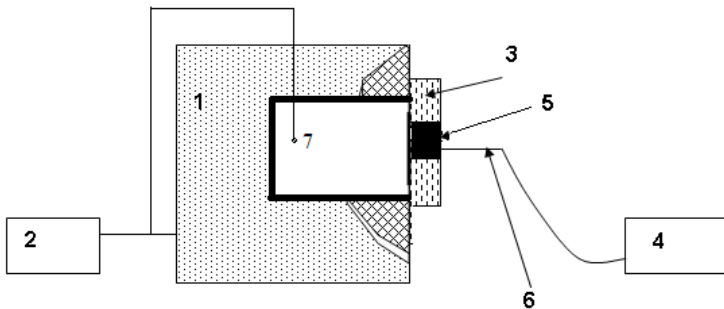


Fig. S2.1. The principal scheme of the one-side heating equipment that was used for one side heating tests: 1 – electric oven; 2 – electric oven heating control unit; 3 – sample storage device with mineral wool insulating; 4 – temperature recorder; 5 – specimen, 6 – measuring thermocouple K type, 7 – thermocouple of oven

Concrete cubes of different mixtures were formed for application of volumetric fire resistance testing method. One edge of the cube was insulated from thermal effects, and the other five were left uninsulated. A concrete cube was easily placed into the furnace on the insulating plate. Figure S2.2 illustrates the principal scheme of the volumetric fire resistance testing method.

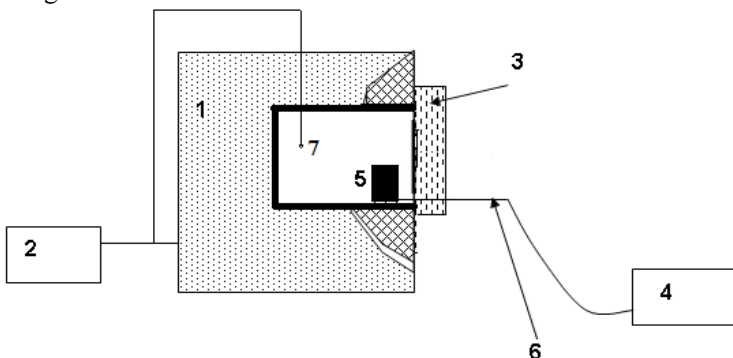


Fig. S2.2. The principal scheme of the volumetric heating equipment that has been used for volumetric heating tests: 1 – oven; 2 – oven heating control unit; 3 – door of chamber; 4 – temperature recorder; 5 – specimen, 6 – measuring thermocouple K type, 7 – thermocouple of oven

The principle of the experiment is to heat the sample from one or all sides as provided for in the LST EN 1363-1:2012 standard according to the regulated temperature time dependence. In addition to the above-listed tests, thermogravimetry of hydrated cement paste and aggregates as well as measurements of weight losses and changes in the ultrasonic pulse velocity propagation speed were performed, compressive strength, also conducting concrete dilatometric research and microstructure analysis using scanning electronic microscopy.

3. Type of cement, aggregates and the amount of air influence on concrete exposed to elevated high temperatures fracture processes

Figure S3.1 illustrates compressive strength of concrete affected by temperature mode according to a one-sided method of evaluation of fire resistance with different cements.

The presented figure S3.1 illustrates that the greatest reduction in the compressive strength after heating was observed with cement containing 17% of slag, and was 30.5%. A sample with cement with 70% slag content disintegrated by way of explosive spalling in 30 minutes, and lost 18.8% of compressive strength; it is estimated that having continued the experiment for up to 3 hours, the sample would have disintegrated in full. Concrete samples with cement containing 17% limestone additive lost the least (12.5%) compressive strength. These results can be explained by the conducted dilatometric tests presented in Figure S3.2.

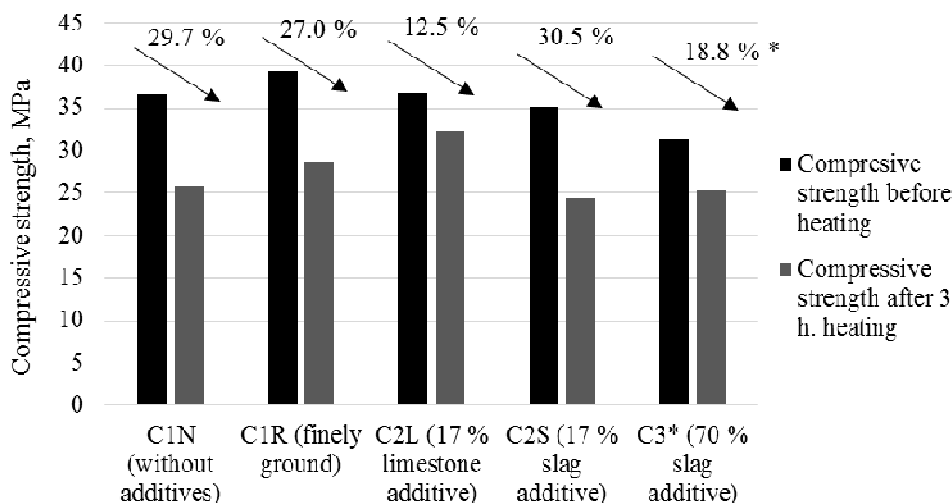


Fig. S3.1. Concrete compressive strength of samples with different cements.

* – explosive spalling, result after 30 min.

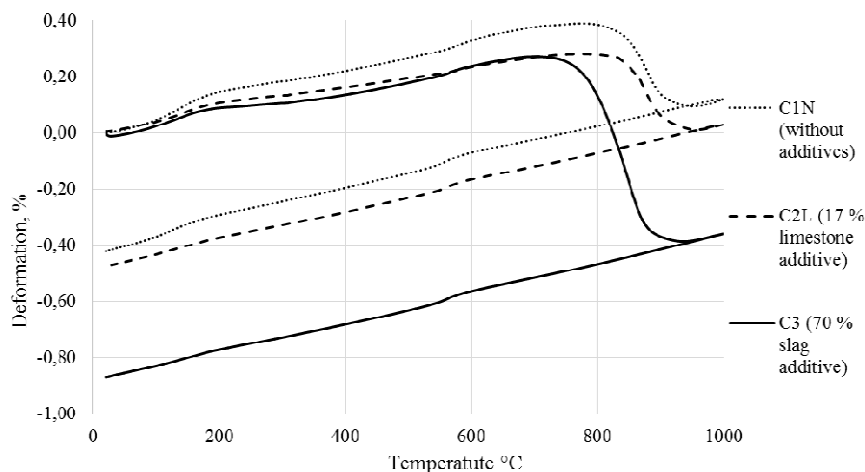


Fig. S3.2. Concrete samples thermal expansion and shrinkage with different cements

The presented Fig. S3.2 illustrates different deformations of concrete samples with different mineral additives. The greatest deformations were observed in concrete samples with 70 % slag additive, which account for about 1% in total. The lowest deformations were captured in concrete samples with 17% limestone additive, accounting for about 0.5%. These results allow stating that concrete with cement containing 17% limestone additive is more resistant to temperature effects.

Fig. S3.3 illustrates compressive strength of concrete under the influence of temperature mode according to a one-side fire resistance evaluation method, with different aggregates.

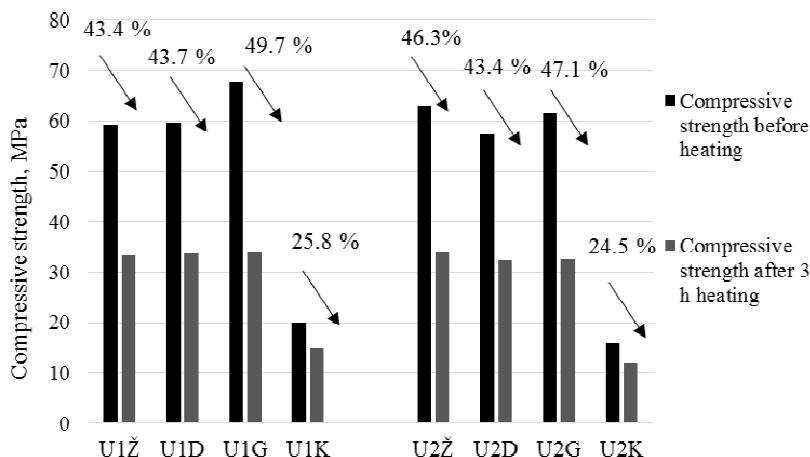


Fig. S3.3. Concrete compressive strength decrease of samples after one side heating with different aggregates

The obtained results reveal that the greatest reduction in compressive strength was captured in concrete samples with granite aggregate accounting for 49.7% (with cement without additives) and 47.1% (with cement containing 17 % limestone additives). Better results were captured with expanded clay aggregate, where the decrease in compressive strength accounted for 25.8% (with cement without additives) and 24.5% (with cement containing 17% limestone additives). These results may be explained by thermogravimetric and dilatometric tests illustrated in Figures S3.4 and S3.5.

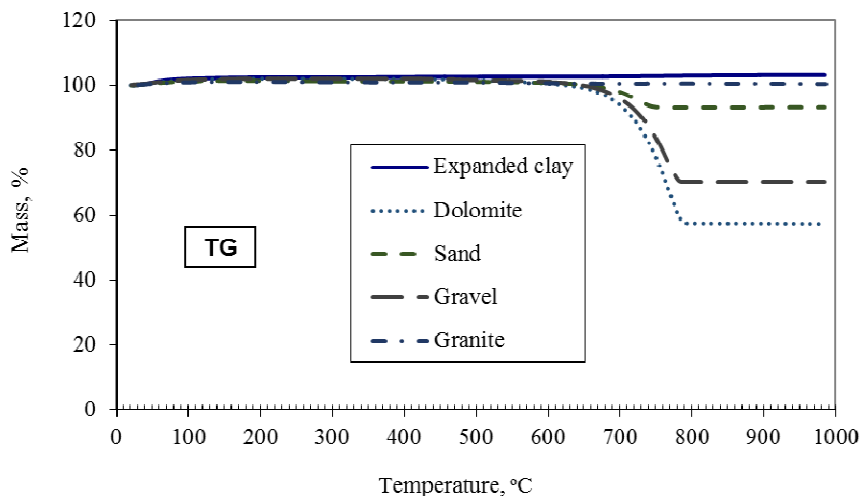


Fig. S3.4. Termogravimetric curves of different type of aggregates

Curves illustrating weight loss presented in Figure S3.4. show that no temperature decomposition takes place in expanded clay and granite aggregates, but weight losses were captured in sand, gravel and dolomite. Calcium and magnesium carbonates decompose at 650–800 °C, which affects mechanical properties of concrete.

Figure S3.5 illustrates different deformation of concrete samples with different aggregates. The greatest deformation were captured in concrete samples with crushed granite aggregate accounting for about 1.8%. The lowest deformations were captured in concrete samples with expanded clay aggregate accounting for about 0.9%. These results allow stating that concrete with expanded clay aggregate is more resistant to temperature effects; when it comes to heavy aggregates, lowest deformations were captured with crushed dolomite aggregate.

Figure S3.6 illustrates concrete compressive strength affected by temperature mode according to a one-side fire resistance testing method with different entrained air content. Data presented in Figure S3.6. reveals that the worst results were captured with concrete with the lowest air content of 3.2% (concretw without air entrained admixture). Compressive strength decreased by 44.9%. The best results were achieved with the greatest air content (14%), when the compressive strength decreased by 26.4%.

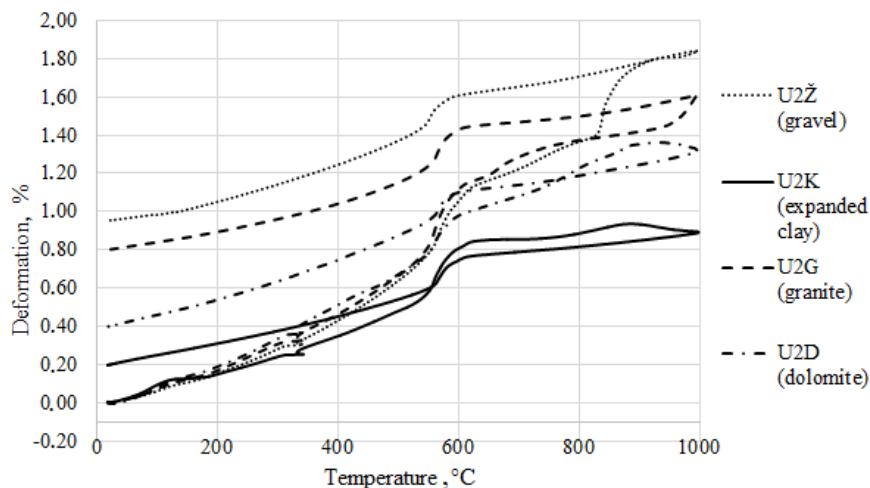


Fig. S3.5. Thermal expansion and shrinkage of concrete samples with different aggregate

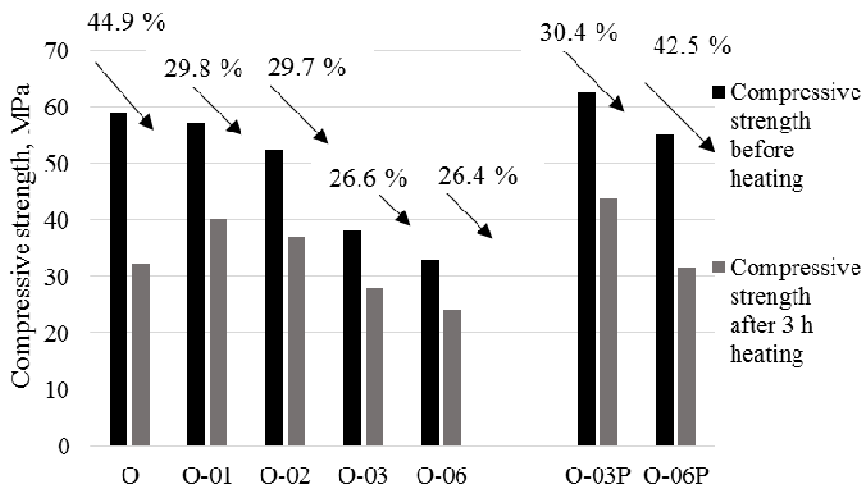


Fig. S3.6. Compressive strength before and after heating of concrete samples with different entrained air content

Figure S3.7 presents photos of microstructure of heated surface of concrete with different content of entrained air.

Figure S3.7 illustrates that surface particles of samples without air entraining admixtures (air content 3.2%) started chipping off and crumbling of the sample after 3 hours of heating. Deep cracks formed in samples with 0.2% air-entraining admixture (air content 5%), while surface of samples with 14% air content changed the least, with

shallow cracks. Such effect could be explained by the fact that water vapour spread to larger pores, forming lower pressure and lower stresses.

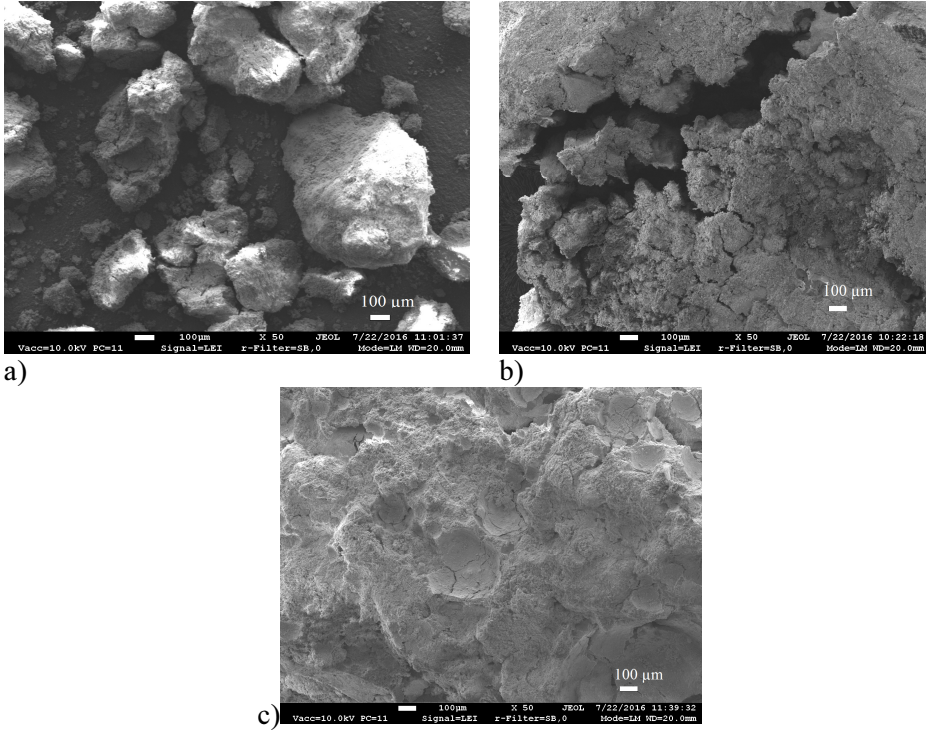


Fig. S3.7. Concrete samples with different content of entrained air surface microstructure: a) 3.2 %; b) 5.0 %; c) 14 %

Temperature curves obtained during the experiments allow accurately describing the dependences received by polynomial functions. Having conducted regression analysis, empirical equations were drawn up, which allow forecasting concrete temperature (T , °C) after the chosen heating duration (τ , min) at the selected distance from the heating surface (a , cm).

$$T = 439 + 8.3 \tau - 0.025 \tau^2 - 226a + 25a^2 - 0.14 \tau a \quad (\text{S.1})$$

$$T = 435 + 8.3 \tau - 0.025 \tau^2 - 227a + 25a^2 - 0.19 \tau a \quad (\text{S.2})$$

The equation (S.1) is used when no air-entraining admixture was added in concrete, while the equation (S.2) is used when air-entraining admixture was added to the mixture.

Figures S3.8 respectively, present a graphic polynomial dependence according to S.2 empirical equations. Since the critical temperature of steel at the time of the fire is 500 °C, it is important that concrete does not reach this temperature for as long as possible.

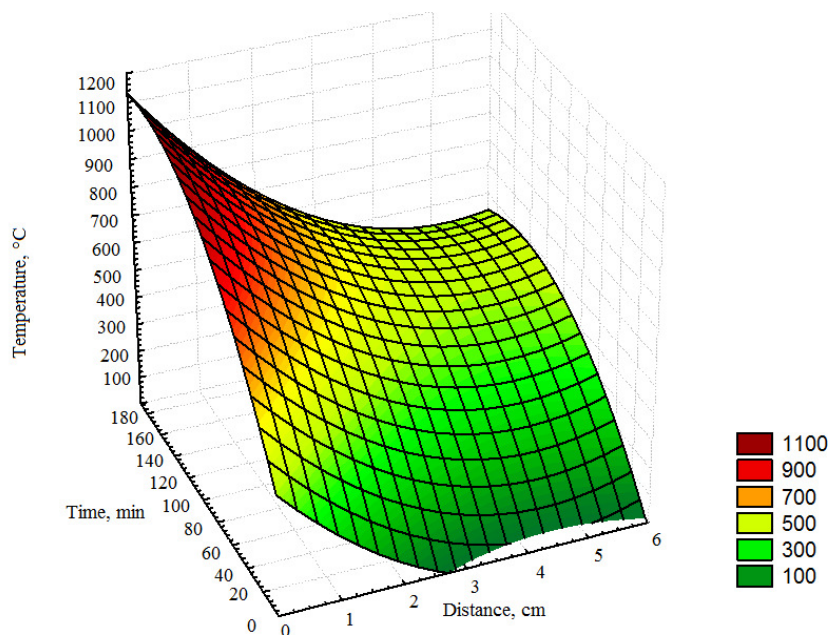


Fig. S3.8. Temperature dependence on time and distance from the surface of the test in accordance with S.2 empirical formula

The results of investigation shows the tested concrete in 5 cm distance from heated surface after 180 min don't receive critical temperature equal to 500 °C when entrained air content in concrete is more than 4 %, in 3 cm distance from heated surface this temperature don't receive after 100 min and in 2 cm distance from heated surface after 60 min.

General conclusions

1. Cement containing limestone additive (CEM II A-LL type) is most suitable for concrete resistant to temperature effects. Measurements of temperature fields of concrete with cements with different mineral additives at a distance of 5 cm from the heated surface in 3 hours of impact according to a standard fire curve reveal that the lowest temperature (lower by about 24 °C) is achieved and lowest losses in compressive strength of concrete with cement containing limestone additive after thermal effect account for 12.5%, while concrete with other cements loses 27.0% – 30.5% of strength. The received results can be explained by lower adsorbed water content in hardened cement paste and destruction of carbonate additive at higher

temperature than calcium silicate hydrates, composed after clinker hydration process.

2. Expanded clay aggregate has an advantage in terms of fire resistance compared to other aggregates. The reduction of the compressive strength of concrete expanded clay aggregate decreases by about 25–26% with different aggregates accounts for 43–49%. The received results can be explained by lower thermal deformations of concrete with this aggregate. Having conducted temperature distribution tests with different concrete aggregates according to the standard fire curve, it turned out that the lowest temperature at the distance of 5 cm was achieved with dolomite aggregate, which was 531 °C in case of cement without additives and 509 °C in case of cement with limestone additive.
3. Having increased entrained air content in concrete mixture up to 4–5%, the loss of compressive strength after thermal effects decreases significantly: from 44.9%, when entrained air content is 3.2% (concrete without air-entraining admixture), to 29.8%, when entrained air content is 4.0 %; 29.7%, when entrained air content is 5%; 26.6%, when entrained air content is 10%, and 26.4%, when entrained air content is 14 %. Tests of temperature fields in concrete samples with different entrained air content reveal that temperature is by about 31 °C lower at the distance of 5 cm from the heated surface in concrete with 5% entrained air content compared to concrete without air-entraining admixture. The received results can be explained by high closed porosity level of concrete, which compensates the forming internal stresses and water vapour pressure at the time of exposure to heat.
4. The best results in terms of fire resistance of concrete were achieved with cement containing limestone additive, coarse dolomite aggregate and 5% entrained air content. After temperature impact according to the standard fire curve, such concrete loses 29.7% of its compressive strength after 3 hours of heating. Temperature value of concrete at the distance of 5 cm from the heated surface stays below 480 °C. Having increased air content in concrete mixture up to 5% the reinforced concrete structures can by produce with 5 cm concrete protective layer and fire resistance corresponded to REI 180.
5. The empirical equations obtained with the help of test results of the one-side heated cube specimens can be used for predicting temperature distribution within the concrete cover. These equations could enable a more accurate assessment of the required cover thickness in reinforced concrete structures.

Priedai³

- A priedas.** Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Vytautas JOCIUS
CEMENTO TIPO, UŽPILDŲ IR ORO KIEKIO MIŠINYJE
ĮTAKA BETONO ATSPARUMUI UGNIAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
medžiagų inžinerija (08T)

CEMENT TYPE, AGGREGATES AND AIR CONTENT
IN CONCRETE MIXTURE INFLUENCE ON THE FIRE
RESISTANCE OF CONCRETE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2017 07 18. 11,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius